ECOLOGÍA
La riqueza submarina del Mediterráneo

INTELIGENCIA ARTIFICIAL
Los nuevos tests de Turing

INMUNOLOGÍA
Linfocitos sintéticos contra el cáncer

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Mayo 2017 InvestigacionyCiencia.es

MISIÓN A ALFA CENTAURI

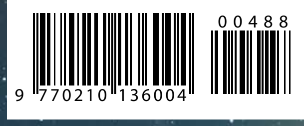
Una flota de sondas diminutas aceleradas mediante láseres se dispone a alcanzar el sistema estelar más cercano al Sol

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

MISIÓN A ALFA CENTAURI | NUEVOS TESTS DE TURING | RIQUEZA SUBMARINA DEL MEDITERRÁNEO

N.º 488

MAYO 2017



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Mayo 2017, Número 488



PATRICK CAVAN BROWN

ARTÍCULOS









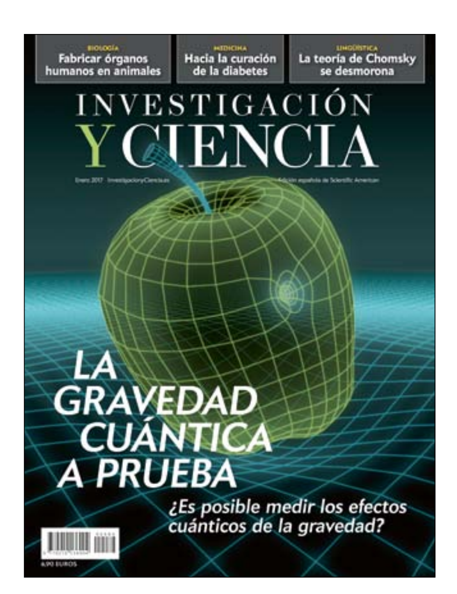
SECCIONES

EN PORTADA



Un ambicioso proyecto pretende enviar un enjambre de pequeñas sondas espaciales al sistema estelar de Alfa Centauri, situado a cuatro años luz de la Tierra. Tras poner las naves en órbita, un potente sistema de láseres las aceleraría hasta el 20 por ciento de la velocidad de la luz, por lo que solo tardarían 20 años en llegar a su destino. Sus proponentes ven posible el lanzamiento para dentro de dos décadas. Ilustración de Chris Wren, Mondolithic Studios.

redaccion@investigacionyciencia.es



Enero 2017

EL ORIGEN DE LA GRAMÁTICA

El artículo de Paul Ibbotson y Michael Tomasello «Hacia un nueva visión del lenguaje» [Investigación y Ciencia, enero de 2017] pretende demostrar que la teoría chomskiana, la cual postula la existencia de una gramática universal, «se está desmoronando». Los autores afirman que los lingüistas la están «abandonando en manada» y que las razones de ese abandono se deben a que la gramática universal «se muere» por no ser capaz de afrontar nuevos descubrimientos. Estos son, por una parte, el de lenguas con características que, según los autores, no se ajustan a los patrones de la gramática universal; y, por otro, el hallazgo de que la adquisición de la lengua no puede explicarse a partir de una facultad específicamente gramatical, sino mediante una serie de facultades más generales que permitirían que el niño adquiriese la gramática a partir del uso de la lengua a la que está expuesto en su entorno.

Quizá por su patente objetivo de llevar a los lectores a creer que la gramática universal ya está superada y que hay que abandonarla para siempre, el artículo presenta una mera caricatura de la teoría que miles de lingüistas están elaborando en la actualidad.

El texto abunda en ejemplos que demuestran la falta de interés de los autores para con el objeto de su crítica. Entre otras cuestiones que no hacen justicia a la teoría que los autores pretenden censurar, sorprende que no se mencione el último modelo chomskiano, el programa minimista, o la simplificación extrema de la regla de las «preguntas-qu», la cual no incluye la categoría funcional de complementizador, un elemento fundamental en su composición.

El descubrimiento de lenguas que no se ciñen a los patrones de la gramática universal ha sido siempre el motor que ha hecho evolucionar la teoría hacia un modelo basado en operaciones fundamentales y rasgos que las activan. A partir de este, las características básicas de la adquisición de la lengua, las cuales ni siquiera se comentan en el artículo, se explican de manera diáfana. Por ejemplo, el hecho de que, con independencia de cuál sea el idioma hablado en su entorno, los niños adquieren la lengua de manera rápida, uniforme, en circunstancias variables y sin dificultad; o la existencia de aspectos del conocimiento lingüístico que no proceden directamente del entorno (el problema de la pobreza de estímulo). Estas características difícilmente pueden explicarse a partir de un modelo que todo lo confía al uso.

Precisamente, en el mismo número de Investigación y Ciencia se publica el artículo de Anna Gavarró «Pautas universales en la adquisición del lenguaje», en el que la autora resume los resultados de una investigación europea que ha demostrado que la adquisición de los cuantificadores por parte de niños de más de 30 idiomas de 11 familias lingüísticas muy diferentes sigue patrones similares, con independencia de las características específicas que presenten los cuantificadores en cada lengua particular. Este descubrimiento resulta compatible con los postulados innatistas chomskianos, pero se hace difícil de reconciliar con una teoría de la adquisición del lenguaje basada exclusivamente en el uso.

Mireia Llinàs-Grau
*Departamento de filología inglesa y germanística
y colaboradora del Centro de Lingüística Teórica
Universidad Autónoma de Barcelona*

Ibbotson y Tomasello critican la propuesta chomskiana de que nacemos equipados con una «plantilla gramatical» y postulan, como alternativa, una lingüística basada en el uso, en la que los niños adquieren las reglas y categorías gramaticales mediante una serie de herramientas cognitivas de uso general. Este enfoque implica correctamente que el habla constituye un comportamiento que se adquiere a través de la experiencia vital de la persona; pero, al igual que la teoría chomskiana, hace numerosas suposiciones no comprobables sobre procesos mentales que no observamos.

Una teoría sobria y científica es la propuesta por el psicólogo experimental B. F. Skinner en su obra de 1957 *Verbal behavior*. Puede que hoy no estuviésemos hablando de Chomsky si este no hubiese escrito en 1959 una crítica negativa del libro de Skinner.

A diferencia de las «teorías» chomskianas y otras, la de Skinner se basa en décadas de trabajo experimental. Como prueba de su larga vida, sigue generando investigación y continúa usándose en todo el mundo para ayudar a niños con déficits lingüísticos.

Henry D. Schlinger, Jr.
*Departamento de psicología
Universidad de California en Los Ángeles*

Erratum corrige

Debido a un error de edición, en el artículo de Paul Ibbotson y Michael Tomasello **Hacia una nueva visión del lenguaje** [Investigación y Ciencia, enero de 2017], el análisis de la oración *Tengo zapatos* se refiere al fenómeno gramatical que aparece en ella como «elisión del verbo». El elemento gramatical elidido es el sujeto, no el verbo. Agradecemos esta observación a Mireia Llinàs-Grau, de la Universidad Autónoma de Barcelona.

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LA INSTALACIÓN NORCOREANA de Yongbyon, aquí en una imagen por satélite de 2008, ha levantado sospechas por la posible producción de plutonio con fines militares. El inserto muestra la construcción de un reactor en 2015.


DIGITALGLOBE, GETTY IMAGES

DEFENSA

Neutrinos para detectar programas nucleares

Un nuevo proyecto planea aprovechar la física de partículas para localizar proyectos militares ocultos

Estamos en 2030. Tras años de forcejeos, los líderes de Corea del Norte aceptan dejar de fabricar plutonio para uso militar y aprueban destruir sus reservas. Los responsables coreanos invitan a los inspectores a observar cómo cargan ese combustible en los reactores y lo inutilizan. En secreto, sin embargo, desvían algo de plutonio y llenan el reactor con uranio para uso civil. El uranio emite radiación en la que hay neutrinos y antineutrinos, partículas subatómicas inofensivas que atraviesan con suma facilidad el plomo y la piedra. Las autoridades internacionales lo sospechan e instalan cerca del reactor un artilugio del tamaño de un todoterreno. En unos meses, confirman el engaño gracias al análisis de los neutrinos procedentes de la central.

Historias así podrían hacerse realidad en los próximos años gracias a varias técnicas desarrolladas en física de partículas. Una nueva propuesta, detallada hace poco en el repositorio de artículos en línea arXiv.org, describe cómo construir un detector de neutrinos que, en pocos meses, lograría determinar si un reactor está utilizando o no combustible apto para uso militar. Cada vez se hace más urgente contar con métodos de detección similares: Corea del Norte ha mejorado sus misiles e Irán ha desarrollado la capacidad para poner en marcha su propio programa de armas nucleares. En marzo, el secretario de Estado de EE.UU., Rex Tillerson, pidió un «enfoque diferente» para sofocar las aspiraciones nucleares norcoreanas, con el argumento de que la presión diplomática había fracasado.

Los neutrinos constituyen un producto secundario de las reacciones de fisión que tienen lugar en un reactor nuclear. En ellas, los núcleos atómicos radiactivos, como el de plutonio, se dividen en elementos más ligeros. Un tipo de radiactividad, la desintegración beta, libera un positrón y un neutrino, o bien un electrón y un antineutrino. Esos neutrinos delatan lo que ocurre en el reactor, ya que solo los elementos radiactivos del combustible nuclear los emiten en grandes cantidades y a un ritmo constante.

La vigilancia nuclear basada en neutrinos ha impulsado el proyecto estadounidense WATCHMAN («El Vi-

gilante», acrónimo en inglés de Monitor de Neutrinos por Efecto Cherenkov en el Agua). Sus detectores serían tanques llenos de miles de toneladas de agua dopada con gadolinio y, en teoría al menos, podrían descubrir los neutrinos emitidos por un reactor ilícito situado hasta a mil kilómetros de distancia. Es difícil pedir diplomáticamente a una nación recelosa que permita que los inspectores construyan enormes tanques de agua cerca de instalaciones protegidas, por lo que la posibilidad de una detección a distancia es más que bienvenida.

Cuando un antineutrino incide sobre un protón (un núcleo de hidrógeno en una molécula de agua del tanque), este se transforma en un neutrón y un positrón. El positrón sale despedido a tal velocidad que emite radiación de Cherenkov, el equivalente lumínico de un estampido sónico. Esta se genera cuando una partícula avanza en un medio a una velocidad mayor que la de la luz en dicho medio. Nada puede superar la velocidad de la luz en el vacío, pero, en un material (como el agua, el vidrio o el aire), la luz avanza más despacio, por lo que su velocidad sí puede rebasarse. De esta manera, un positrón emitido tras la colisión entre un protón y un antineutrino generaría un destello de luz de Cherenkov en uno de los tanques de WATCHMAN. Mientras, el gadolinio absorbería el neutrón, lo que produciría un segundo destello. Esta doble señal característica revela la presencia de un reactor nuclear y la dirección en la que se encuentra.

WATCHMAN podrá indicar si un reactor está activo y dónde se halla, pero no la mezcla exacta de sus combustibles, como plutonio y uranio muy enriquecidos. Patrick Jaffke, investigador posdoctoral del Laboratorio Nacional de Los Álamos y coautor de la nueva propuesta, sugiere construir una versión de poco tamaño que, colocada cerca de un reactor, podría determinar de qué tipo de combustible se trata a partir del análisis de los neutrinos. El diseño de Jaffke ha sido pensado para medir el espectro y la forma del destello de Cherenkov inicial y, por tanto, la energía del positrón procedente de la colisión del antineutrino. Al analizar la distribución de energía de los positrones, un inspector podría calcular qué parte de la emisión total de antineutrinos procede de un tipo dado de combustible en el núcleo del reactor.

En vez de agua, Jaffke sugiere usar plástico o algún otro hidrocarburo con una gran densidad de protones. Ello aumentaría el número de colisiones y permitiría reducir en órdenes de magnitud el tamaño del dispositivo. Un detector de este tipo podría situarse a unas docenas de metros del reactor.

Aunque más pequeño, semejante detector seguiría adoleciendo del problema del ruido de fondo. Los rayos cósmicos, por ejemplo, crean neutrones similares a los generados en las reacciones con neutrinos. Instalar el detector entre cinco y diez metros bajo el suelo y razonablemente cerca del reactor resolvería el problema, explica Steven Dazeley, físico del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore que, en 2016, dirigió un análisis del ruido de fondo al que tendrá que enfrentarse WATCHMAN. Un blindaje adicional en torno al dispositivo también resultaría útil.

Hay otras ideas para diseñar aparatos que necesitarían poco o ningún blindaje. Además, la ayuda podría llegar de varios grupos que, en distintas partes del mundo, trabajan en técnicas de detección de neutrinos para investigar en física.

«Hace tiempo que se busca un uso práctico de los antineutrinos», apunta Jaffke. Según el investigador, esa sería una de las mejores cosas de emplear estas partículas para encontrar combustible nuclear militar. Esperemos que no hallen nada.

—Jesse Emspak

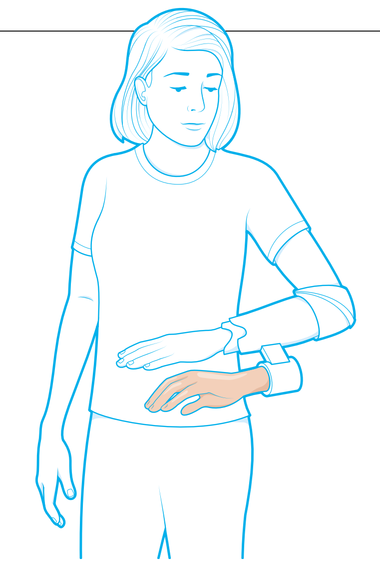
MEDICINA

Manos de repuesto

Las extremidades afectadas por lesiones nerviosas pueden sustituirse ahora por otras biónicas

Según un estudio de 2008, cerca de 1,6 millones de estadounidenses han sufrido la amputación de una extremidad, cifra que podría llegar a doblarse con creces en 2050. Las prótesis modernas permiten reemplazar las extremidades perdidas a causa de traumatismos o enfermedad. Pero las personas que pierden la funcionalidad de un brazo o de una pierna que por lo demás son sanos gozan de menos opciones. Un equipo de cirujanos de Viena ha diseñado reconstrucciones biónicas de las manos para 16 personas que carecían del control y la sensibilidad manual a causa de lesiones nerviosas. El quid de la cuestión estriba en que el paciente ha de renunciar a su mano si quiere recibir la prótesis.

A fin de detallar las opciones y sopesar todas las ventajas e inconvenientes, la cirujana Laura Hruby y sus colaboradores de la Universidad de Medicina de la capital austríaca publicaron un protocolo para seleccionar a los primeros pacientes que podían beneficiarse de la operación y guiarles en todo el proceso.



El equipo vienés escogió personas con lesiones en el plexo braquial, el haz de nervios que controla la musculatura de los hombros, brazos y manos. «La reconstrucción biónica de la mano en los afectados por lesiones del plexo en que ha fracasado la reconstrucción primaria y secundaria aporta un rayo de esperanza para aquellos que han vivido con una mano inútil durante años o décadas», asegura Hruby. El ingenio mejoró la destreza manual más de lo que sería posible con una operación quirúrgica, según la investigación, que vio la luz el pasado enero en *Journal of Neurosurgery*. Asimismo, mitiga el fuerte dolor espontáneo que a veces afecta a las extremidades con lesiones nerviosas.

—Dan Robitzski

ETAPAS DE LA RECONSTRUCCIÓN

1. La mano biónica se monta junto a la original en un soporte sujeto al brazo y se conecta a unos electrodos que enlazan con los nervios funcionales del antebrazo a través de la piel. En esta fase, el paciente adquiere pericia en el control de la prótesis.

2. La mano natural se amputa.

3. Una vez recuperado de la intervención quirúrgica, se procede a trasladar la mano biónica de su posición provisional al muñón de la muñeca.

BROWN BIRD DESIGN

INGENIERÍA

Mallas contra la contaminación

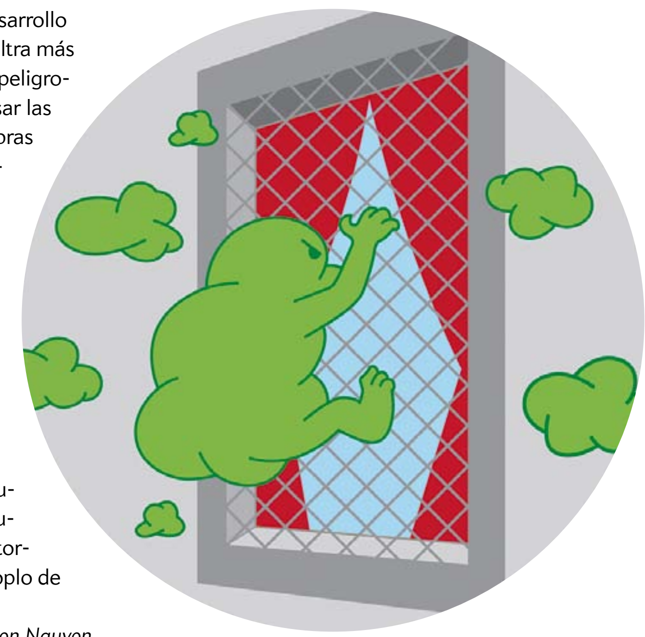
Un recubrimiento de nanofibras para mosquiteras permite purificar el aire que entra por la ventana

Unas nuevas mosquiteras con nanofibras que atrapan contaminantes tal vez permitan respirar mejor a los residentes de las urbes asfixiadas por la polución. Las fibras, compuestas de polímeros con nitrógeno, se rocían sobre una mosquitera mediante una técnica conocida como «hilado por soplo», en la que una corriente de aire estira las gotitas de solución de polímero en un espray para formar una fina capa de nanofibras.

Hace poco, un equipo de investigadores de Stanford y de la Universidad Tsinghua de Pekín publicó en *Nano Letters* el desarrollo de una variedad de polímero que filtra más del 90 por ciento de las partículas peligrosas que típicamente suelen atravesar las mosquiteras corrientes. Las nanofibras se rociaron sobre una malla de nailon enrollable a una velocidad de casi un metro por minuto. Los investigadores también las depositaron sobre una malla metálica y, tras una absorción intensa, limpiaron la película con papel.

En una prueba de 12 horas en un día muy brumoso en Pekín, una mosquitera recubierta con nanofibras de poliacrilonitrilo bloqueó el 90 por ciento de las partículas perjudiciales en suspensión, causantes de cáncer de pulmón y trastornos cardíacos. Sin duda, todo un soplo de aire fresco.

—Tien Nguyen



TECNOLOGÍA

Mapas 3D sobre la marcha

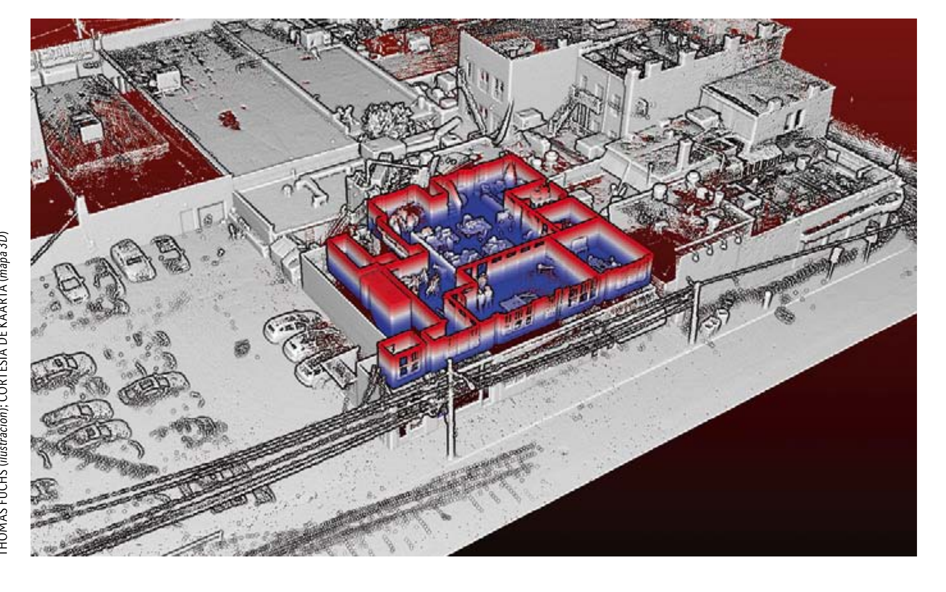
Un láser medidor de distancias ayudará a los constructores a automatizar la toma de datos para elaborar mapas de edificios y otros entornos

Los fabricantes de automóviles y otras compañías recién llegadas al sector, como Tesla y Uber, se hallan inmersos en una carrera para poner en circulación coches autónomos. Ese empeño ha espoleado el avance de varias de las técnicas necesarias; entre ellas, la de los láseres medidores de distancias conocidos como lídares. Estos dispositivos dispersan luz en múltiples direcciones y efectúan cientos de miles de mediciones por segundo, a partir de las cuales obtienen una «nube de puntos» de información espacial. Después, un ordenador procesa los datos y construye una imagen coherente del entorno del vehículo.

Kaarta, una nueva compañía radicada en Pittsburgh, ha integrado un lídar (hoy más rápidos y asequibles gracias al acelerado desarrollo potenciado por la industria del automóvil), un detector de movimiento, un procesador y una pantalla táctil de siete pulgadas en un dispositivo de mano. Bautizado Contour, la firma asegura que permitirá a arquitectos y constructores generar modelos tridimensionales del entorno sobre la marcha, mientras van caminando por él. Una cámara instalada en el aparato capta datos de color y los añade a la nube de puntos para que el modelo cobre tonalidades realistas. Cuando este se carga en un programa de diseño asistido por ordenador (CAD), puede emplearse como punto de partida para diseñar planes de renovación de edificios u otros proyectos.

El director de Kaarta, Kevin Dowling, asegura que Contour deja muy atrás a las cintas métricas y los portapapeles que todavía usan la mayoría de los constructores para obtener los datos de los modelos de CAD, lo que permitirá ahorrar tiempo. La firma espera comenzar a suministrar el aparato en la segunda mitad de 2017.

—Michael Belfiore



MAPAS 3D AUTOMÁTICOS: Según su fabricante, un nuevo dispositivo permitirá obtener en menos de media hora mapas tridimensionales del entorno, como el de estas oficinas comerciales.

THOMAS FUCHS (*ilustración*); CORTESÍA DE KAARTA (*mapa 3D*)

COGNICIÓN

Los cerebros bilingües recuerdan

Los niños adoptados conservan rudimentos del lenguaje natal aunque no lleguen a dominarlo

Nuevos indicios apuntan a que los elementos básicos de una lengua pueden conservarse en la memoria hasta la edad adulta, aunque no la hablemos ni la entendamos. Haberla oído durante las primeras semanas de vida también facilita aparentemente el proceso de aprendizaje en momentos ulteriores.

En el nuevo estudio, publicado recientemente en *Royal Society Open Science*, se instruyó a adultos holandeses para que escucharan contrastes fonéticos en coreano. Algunos declararon no haber oído una palabra pronunciada en ese idioma; otros habían nacido en Corea, pero habían sido adoptados por familias holandesas antes de cumplir los seis meses. Todos declararon no saber coreano, pero los adoptados en ese país distinguían mejor los contrastes y eran más precisos a la hora de pronunciar los sonidos propios de este.

«El aprendizaje de la lengua puede permanecer enterrado en el subconsciente, aunque la memoria consciente del lenguaje no exista», afirma Jiyoun Choi, investigador posdoctoral de la Universidad Hanyang y autor principal del estudio. Y parece que un breve período de exposición a tan tierna edad facilita el aprendizaje después; cuando Choi y sus colaboradores compararon los resultados de las personas adoptadas antes del medio año con los de otros adoptados después de los 17 meses, no hubo diferencias en sus aptitudes de comprensión y expresión verbal.

«Es fascinante que tales efectos se observen en adultos que únicamente escucharon el coreano hasta el sexto mes de vida, antes de los primeros balbuceos», afirma Janet Werker, profesora de psicología de la Universidad de la Columbia Británica, que no ha participado en la investigación. Sorprende que lo que hemos aprendido antes de poder hablar permanezca con nosotros durante décadas.

—Jane C. Hu

NIDO ABOVEDADO de un pinzón de Darwin fuliginoso (*Geospiza fuliginosa*) (*1*); nido en copa de un chingolo cejiblanco (*Spizella passerina*) (*2*).

EVOLUCIÓN

La forma de los nidos

Los pájaros empezaron por construir nidos abovedados antes que los de forma en copa

¿Qué fue primero, el cuenco o la bóveda? A diferencia de la antigua adivinanza del huevo o la gallina, esta pregunta parece tener respuesta. Un reciente estudio plantea que el familiar nido abierto en forma de copa o cuenco que confeccionan casi tres cuartas partes de los pájaros paseriformes (aves canoras) es una modificación de los nidos cubiertos más o menos esféricos que hoy solo construye un reducido número de ellos.

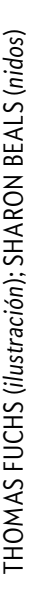
La mayoría de los biólogos ha teorizado que la forma del nido evolucionó en sentido inverso, del cuenco a la bóveda. Pero, hace poco, un grupo de investigadores ha sometido a prueba esa hipótesis al superponer los datos de las estructuras de los nidos sobre tres árboles filogenéticos, concebidos para representar los lazos evolutivos entre 281 paseriformes de Australia. El equipo reparó en que las especies pertenecientes a ciertos linajes primitivos, como las aves-lira (Menuridae), los matorraleros (Atrichornithidae) y los acantisitas (Acanthisittidae), aún construían nidos con techo, dato que sugiere que los ancestros de los paseriformes fabricaban nidos abovedados. Un análisis estadístico de la probabilidad de que determinadas configuraciones de nido se originaran en tiempos remotos confirmó la corazonada: la forma abovedada apareció primero.

También se ha constatado que la fabricación del nido en forma de cuenco surgió en repetidas ocasiones y en diferentes linajes; 187 de las especies estudiadas lo construyen en la actualidad. Los resultados se detallaron el pasado febrero en *Proceedings of the Royal Society B*.

La forma abierta ofrece ciertas ventajas, como la sencillez de su construcción o la rápida huida en caso de peligro. «Creo que la mayoría de nosotros ha supuesto que el nido techado es un refinamiento del nido en copa en parte porque el primero resulta infrecuente en la actualidad», afirma uno de los autores, J. Jordan Price, profesor de biología en el Colegio St. Mary de Maryland. «Es un buen ejemplo de que la prevalencia actual de cierto rasgo no refleja necesariamente el orden de los acontecimientos a lo largo de la historia evolutiva.»

Los hallazgos podrían poner al día el estudio de la evolución del nido, asegura Gavin Leighton, biólogo evolutivo del Laboratorio de Ornitología de Cornell, ajeno al estudio. «Creo que cada vez habrá más interés por determinar los escenarios ecológicos que condicionan cada tipo de nido», opina. Parece que no pueden ponerse todos los nidos en un solo cesto.

—Kat Long



CATÁSTROFES

Pronosticar el comportamiento del suelo

Una nueva generación de modelos de predicción de deslizamientos permitirá emitir alertas creíbles y salvar vidas

A finales de septiembre de 2015, las lluvias empaparon durante días el terreno que rodeaba la aldea de El Cambray II, en Guatemala. En la primera noche de octubre, unas laderas pronunciadas, sostenidas desde hacía tiempo por gruesas raíces de árboles tropicales, cedieron de repente y enterraron cientos de hogares bajo un torrente de barro de hasta 15 metros de altura. Al menos 280 personas murieron.

Las autoridades llevaban años advirtiendo de que el área se encontraba en una zona de riesgo. Sin embargo, la combinación de pobreza y desconfianza hace que la población más desfavorecida de América Central y otras regiones construya y viva en terrenos peligrosos. Aun así, los residentes de El Cambray II podrían haber accedido a una evacuación temporal si hubieran recibido un aviso creíble y preciso. Y si tales alertas estuviesen disponibles en todo el mundo, el número de muertes anuales atribuidas a deslizamientos podría reducirse en 3000.

Por fortuna, los expertos ya están trabajando en ello. De hecho, la catástrofe de El Cambray II proporcionó los primeros datos con los que validar un innovador programa informático que evalúa el riesgo de deslizamientos casi en tiempo real. El sistema se basa en los datos por satélite de infrarrojos y microondas que posee la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano (NOAA) estadounidense. Estos permiten realizar un pronóstico global de lluvias con una resolución de cuatro kilómetros y con hasta seis horas de antelación. Para facilitar la previsión de inundaciones repentinas, los científicos del Centro de Investigaciones Hidrológicas de San Diego, donde se desarrolló el programa, incorporan después los datos locales de pluviómetros y radares meteorológicos allí donde se encuentran disponibles. Por último, un nuevo componente para predecir deslizamientos se integra en las estimaciones globales de humedad del suelo.

En Guatemala, los colaboradores locales combinan todos los datos en un mapa digital que incluye más de 8000 localizaciones históricas propensas a deslizamientos, gracias a lo cual pueden generar informes de riesgo con una frecuencia de seis horas. Las alertas se aplican a tormentas específicas en áreas que solo miden entre dos y cuatro kilómetros de ancho. Este tipo de avisos resultan más difíciles de pasar por alto que las alertas generales, las cuales pueden extenderse durante varios días, abarcar valles enteros y no siempre tienen en cuenta las condiciones locales del suelo.

La humedad del terreno constituye un factor clave que puede transformar una inundación repentina en un deslizamiento. Según Jacqueline Rivera, ingeniera civil del Ministerio de Medioambiente y Recursos Naturales de El Salvador y una de las encargadas de verificar el sistema de predicción de deslizamientos, una tormenta intensa que afecta a un suelo ya húmedo conlleva un riesgo mayor que la misma tormenta caída sobre un suelo más seco.

En ello radicó la importancia de El Cambray II, ya que fue el primer evento de este tipo acontecido después de que el componente de deslizamientos se hubiese incorporado al pronóstico de inundaciones repentinas. Una vez pasada la tormenta, los investigadores comprobaron que el sistema mejorado identificaba El Cambray II como zona de alto riesgo de aludes durante la tormenta de 2015. El suceso también permitió estudiar con detalle las condiciones del suelo tras la catástrofe y compararlas con la predicción basada en datos de satélite.



1



2

ESTRAGOS de la tragedia ocurrida en El Cambray II: imagen tomada el 2 de octubre de 2015 en las afueras de la ciudad de Guatemala (*1*); equipos de rescate buscando víctimas al día siguiente (*2*).

JOHAN ORDONEZ, GETTY IMAGES

Tales «pronósticos inmediatos» de deslizamientos también se están desarrollando en otras partes del mundo. La geomorfóloga Dalia B. Kirschbaum, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, y sus colaboradores presentaron en línea un sistema global que integra los datos meteorológicos de satélite con un modelo similar de predicción de aludes. La NASA tiene previsto usarlo para ayudar a las organizaciones humanitarias, como el Programa Mundial de Alimentos y el Comité Internacional de la Cruz Roja, a la hora de planificar respuestas ante un desastre.

Mientras tanto, los siete países centroamericanos calibran hasta qué punto los modelos del Centro de Investigaciones Hidrológicas encajan con los datos históricos y a tiempo real de deslizamientos. Más adelante el centro empleará fondos de la Agencia para el Desarrollo Internacional estadounidense para formar a personal de defensa civil en otros 57 países. Por el momento, los modelos y las predicciones solo se comparten con equipos de gestión de desastres, pero Rivera afirma que El Salvador pretende validar el sistema durante la estación de lluvias de este verano y comenzar a usarlo de forma habitual en la emisión de alertas públicas.

Si los avisos más concretos basados en estos sistemas continúan demostrando su precisión, podrían comenzar a ganarse la confianza de los residentes y, más importante aún, salvar sus vidas.

—Lucas Laursen

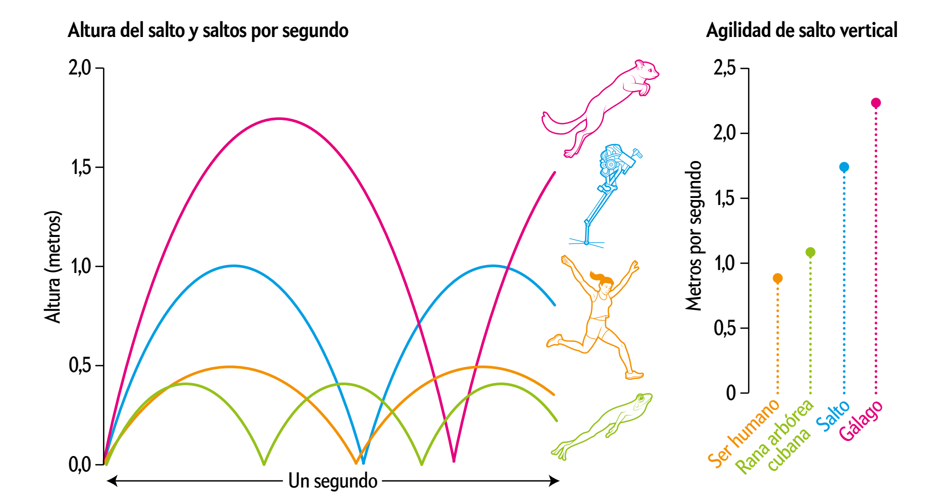
ROBÓTICA

Robots saltarines

Un pequeño mamífero africano ha inspirado la creación de máquinas más ágiles

Los robots son pésimos saltadores. Algunos pueden llegar alto, pero no hacerlo repetidas veces en poco tiempo, y a otros les ocurre lo contrario. Duncan Haldane, robotista y estudiante de doctorado en la Universidad de California en Berkeley, reparó en que una de las consecuencias de todo ello era que muchos de los robots actuales no pueden salvar los grandes huecos ni los elevados obstáculos que, por ejemplo, pueden encontrarse en el lugar de una catástrofe donde hay personas a las que rescatar. Así que decidió fijarse en el reino animal y estudiar los mejores saltadores de la naturaleza, con el objetivo de encontrar uno que sirviese como modelo para crear una máquina más ágil y autónoma.

Haldane comenzó por definir una medida que evaluase tanto la altura a la que podía saltar un animal como la velocidad con que lo hacía. Sus investigaciones concluyeron que el mejor saltador continuo de la naturaleza era el gálago, un pequeño primate nocturno de África. El valor que la medida definida por Haldane arrojaba para los gálagos era el doble que el de cualquier robot actual. Los resultados han sido publicados en *Science Robotics*.



PARA DISEÑAR EL ROBOT SALTO, los investigadores estudiaron la forma de brincar de varios animales, entre ellos el gálago, un pequeño y ágil primate africano. La comparación entre saltadores se efectuó mediante la «agilidad de salto vertical», una métrica que combina la altura de los saltos y el número de ellos por segundo.

Las patas y los músculos del gálago están optimizados para doblar las rodillas y tender el cuerpo hacia delante, una postura que le permite almacenar energía potencial en los tendones. Haldane transfirió esa física a la construcción de un robot al que llamó Salto. Pesa 100 gramos y es capaz de saltar un metro en vertical. Sin embargo, lo más notable es que puede hacerlo desde el suelo hasta un punto en una pared y rebotar otros 1,21 metros de media más arriba. El investigador asegura que el nuevo sistema podría aplicarse a cualquier robot. Tal vez solo sea cuestión de tiempo ver a nuestros amigos mecánicos saltando edificios altos, al menos en múltiples botes.

—Erin Biba

ENERGÍA

¿Hidrógeno verde?

Un avance reciente acerca la posibilidad de fabricar combustible de hidrógeno a partir de la luz solar

El hidrógeno se usa en la actualidad para refinar petróleo y para sintetizar amoníaco, un compuesto fundamental de los abonos agrícolas modernos. Podría también emplearse para generar energía limpia y como ingrediente de pilas de combustible para automóviles y camiones. Sin embargo, este elemento suele obtenerse a partir de gas natural calentado por vapor, un proceso que causa la emisión de gases de efecto invernadero y otros problemas ambientales. Por ello, hace tiempo que los científicos intentan reemplazar dicha técnica por una basada en una fuente de energía renovable. Un avance en esa línea acaba de aparecer publicado en *Nature Energy*.

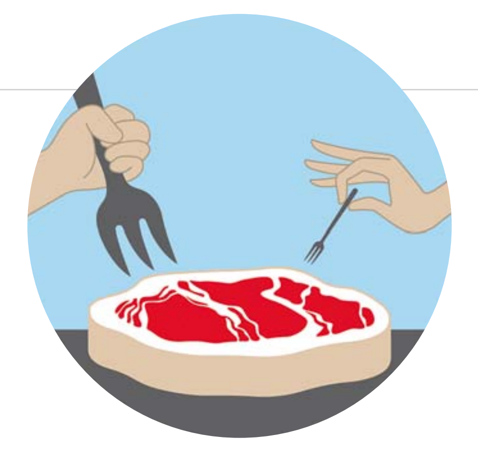
El nuevo método se basa en un dispositivo fotoelectroquímico, un tipo de célula solar capaz de disociar las moléculas de agua con mayor eficiencia que otros procedimientos. Los expertos llevan largo tiempo buscando uno que, además, sea suficientemente duradero para resultar rentable. Un avance clave llegó hace 18 años, cuando John Turner, del Laboratorio Nacional de Energía Renovable de EE.UU., concibió un dispositivo formado por capas de arseniuro de galio y fosfuro de galio e indio, dos semiconductores que destacan por su rendimiento a la hora de convertir la luz solar en electricidad. Hasta 2015, el diseño de Turner mantuvo el récord de eficiencia en la conversión de energía solar en hidrógeno, pero la solución ácida a la que estaba expuesta la célula la dañaba con rapidez, lo que encarecía sobremanera el hidrógeno producido.



En el nuevo trabajo, un grupo de investigadores dirigido por el químico Jing Gu, de la Universidad estatal de San Diego, añadió recubrimientos a las capas de semiconductores para impedir la corrosión ácida. Como resultado, esa protección alargó de manera considerable la vida útil del diseño de Turner y permitió obtener un dispositivo fotoelectroquímico que conservaba el 80 por ciento de su capacidad en las pruebas de durabilidad. Puede que aún quede un largo camino para alcanzar la «economía del hidrógeno», un futuro en el que los consumidores podrán producir su propio hidrógeno para propulsar vehículos y calentar casas, pero este nuevo logro de la ingeniería hace que ese horizonte se antoje menos utópico.

—Melissa C. Lott

BROWN BIRD DESIGN (*figuras*), AMANDA MONTAÑEZ (*gráficas*); FUENTE: «ROBOTIC VERTICAL JUMPING AGILITY VIA SERIES-ELASTIC POWER MODULATION», DUNCAN W. HALDANE ET AL. EN *SCIENCE ROBOTICS*, VOL. 1, N.º 1, ART. EAAG2048, DICIEMBRE DE 2016; THOMAS FUCHS (*ilustración*)



ANTROPOLOGÍA

Orígenes del patriarcado

Los esqueletos antiguos pueden aportar pistas sobre la aparición de la dominación masculina en la sociedad

«Las mujeres y los serviles son de trato difícil. Si te muestras demasiado familiar, se vuelven desobedientes. Si te mantienes distante, se vuelven rencorosos.» Esta aseveración atribuida a Confucio figura en sus *Analectas*, una compilación de pensamientos y preceptos que se remonta al siglo v a.C. Confucio no inventó los prejuicios sexistas, por supuesto, ni concibió su expresión generalizada en el patriarcado. Pero la respuesta a la pregunta de en qué momento y por qué el poder social se concentró por primera vez en la figura masculina podría residir en los huesos de sus ancestros.

La pista emerge del tejido conjuntivo, en concreto del colágeno, examinado en el curso de un estudio de los restos óseos de 175 personas del Neolítico y de la Edad del Bronce que vivieron en China. El análisis de isótopos de carbono en la citada proteína señala el tipo de cereales que ingerían, mientras que el de isótopos de nitrógeno revela la proporción de carne en su dieta, según la investigación publicada en enero en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

Los datos indican que la alimentación de ambos sexos era similar durante el Neolítico, iniciado hace unos 10.000 años con el nacimiento de la agricultura. Ambos comían carne y cereales. «En los albores de la agricultura, la contribución de las mujeres a la producción de alimentos fue importantísima. Varones y mujeres comían lo mismo y gozaban de un estatus similar», aclara Kate Pechenkina, arqueóloga del Colegio Queens, en la Universidad de la Ciudad de Nueva York, y autora principal del artículo.

El cambio de dieta dio comienzo a finales del Neolítico y se mantuvo durante la Edad del Bronce, cuyo inicio en China suele fecharse en torno a 1700 a.C. La gente comenzó a cultivar cada vez más trigo, con una proporción de isótopos de carbono diferente de la del mijo que ya cosechaban. El análisis óseo revela que entre 771 y 221 a.C. los varones siguieron comiendo mijo y carne, pero en cambio esta desapareció de la alimentación de las mujeres y fue sustituida por el trigo. Los huesos femeninos comenzaron a mostrar criba orbitaria, un tipo de osteoporosis que delata desnutrición en la infancia. «Eso indica que las niñas eran tratadas mal desde su tierna infancia», afirma Pechenkina.

Algunos antropólogos sostienen una teoría que explica el desplazamiento del poder con la difusión del trigo, junto con la de otros productos y bienes básicos, como el ganado o el bronce. Estos nuevos recursos supusieron una oportunidad para acumular riquezas y tal vez brindaron la ocasión para que el varón asumiera el control de los nuevos alimentos y bienes, poder que luego emplearía para subyugar a la mujer.

La violencia también pudo desempeñar su papel. «El final de la Edad del Bronce en China comprende el período de los Reinos Combatientes», afirma Stanley H. Ambrose, antropólogo de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, ajeno al estudio. En las civilizaciones forjadas a sangre y fuego, la presencia de una clase guerrera comporta la valoración exagerada del colectivo masculino, explica Ambrose.

En la China antigua ello pudo facilitar la imposición del patriarcado. «Crear un imperio, ya sea un estado de los Andes o de China, es una empresa costosa, pues se suele precisar de un ejército», afirma Jane Buikstra, arqueóloga de la Universidad estatal de Arizona, que no participó en el estudio. Ella cree que la ambición de las antiguas dinastías chinas, conjurada con el afán de los hombres por hacerse con el control de los nuevos recursos de la Edad del Bronce, pudo dar pie a la cultura de subordinación femenina.

No conviene interpretar esta teoría de forma determinista. Las culturas pueden tomar diferentes caminos hacia la inequidad social. Y pueden desmantelarse algunos elementos del sistema. Por ejemplo, avanzar en la igualdad salarial podría reducir en gran medida las diferencias de género que predominan en el mundo occidental, asegura Mace.

Con todo, las pruebas de esa discriminación en la China antigua van más allá de los hallazgos óseos. Los tesoros funerarios hallados en tumbas femeninas de la Edad del Bronce son menos que los hallados en sepulturas masculinas, señal de que también fueron tratadas peor en la hora de la muerte. «La distinción de género, pues, sería para toda la vida», afirma Buikstra.

—*Angus Chen*

THOMAS FUCHS *(ilustración)*; MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS NATURALES *(ballena)*

AGENDA

CONFERENCIAS

11 de mayo
Ondas gravitacionales y agujeros negros
Juan García-Bellido,
Instituto de Física Teórica
Ateneo de Madrid
Madrid
www.ateneodemadrid.com

12 de mayo — Ciclo
La luz del cosmos vista desde los mejores sitios astronómicos
J. Jesús González González
Instituto de Astronomía
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México
www.astroscu.unam.mx

EXPOSICIONES

Océanos: la exposición. El último territorio salvaje
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es



La vida dentro del vino
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com

OTROS

Del 2 al 27 de mayo — Jornadas
La Noche de la Ciencia
Exposiciones, conferencias y otras actividades
Sabadell
www.tauli.cat/nitdelaciencia

7 de mayo — Jornada
Pícnic cosmológico
Con Jordi Miralda,
Instituto de Ciencias del Cosmos
Asociación Pèndulum
Montseny
www.pendulum.es

Hasta el 14 de mayo — Teatro
Galileu, Bertolt Brecht
Dirigida por Carme Portacelli
Club Capitol
Barcelona
www.grupbalana.com

TECNOLOGÍA

La promesa de la bioimpresión en 3D

Aparatos que depositan tintas cargadas de células permiten construir, capa a capa, tejidos y órganos

NEIL SAVAGE

Un treintañero probablemente no piense en que necesita someterse a una operación para arreglarse las rodillas. Sin embargo, dentro de unos decenios, los rigores de la vida diaria o los estragos de la artritis podrían enviarlo al quirófano. Y es posible que allí encuentre una impresora 3D lista para implantarle un hueso o un cartílago nuevo. Así lo espera al menos Ibrahim Ozbolat, ingeniero biológico de la Universidad estatal de Pensilvania que trabaja en el desarrollo de técnicas de impresión en 3D para reparar tejidos como el cartílago. Ozbolat prevé que habrá dispositivos que aplicarán una sucesión de capas de material biocompatible, provisto de células, sobre un defecto. «En el futuro, podremos colocar al paciente bajo la bioimpresora», vaticina. Y su predicción no se limita a las rodillas. «La bioimpresora podrá reparar cualquier zona del cuerpo que lo necesite, sea cual sea.»

Muchos comparten el objetivo de Ozbolat de producir tejido vivo con formas diseñadas cuidadosa y específicamente para reparar o reemplazar partes dañadas del cuerpo. Además de hueso y cartílago, los investigadores están tratando de desarrollar piel, tejidos del sistema nervioso, como retinas, e incluso órganos, como un riñón o un corazón, los cuales se imprimirían en un equipo externo y luego se trasplantarían al cuerpo. Sin embargo, quizá transcurran más de diez años antes de que incluso las estructuras más simples puedan destinarse a uso clínico. A fin de que la obtención de un órgano tan complejo como un riñón sea factible, los investigadores han de refinar los materiales, las técnicas de implantación y su capacidad para crear sistemas complejos como el vascular. La impresión en 3D adaptada a la producción de tejidos a la carta revolucionaría la medicina: se dispondrían fácilmente de tejidos y órganos de trasplante, eliminando las listas de espera por los «repuestos».

Un milagro de la ingeniería

En el mundo de la ingeniería, el término «impresión en 3D» alude de forma genérica a una serie de técnicas que permiten fabricar objetos con casi cualquier diseño mediante la superposición de capas de un determinado material. Siguiendo un patrón por ordenador, las impresoras 3D pueden construir objetos complejos que no serían factibles con técnicas más usuales; así, por ejemplo, pueden crearse contornos internos en lugares que ninguna herramienta alcanzaría. Se ha popularizado su uso en técnicas de prototipado rápido y están haciéndose un hueco en procesos de fabricación de todo tipo, desde la industria médica hasta la aeroespacial.

La versión biológica recibe el nombre de bioimpresión en 3D y emplea técnicas similares, aunque adaptadas para trabajar con células vivas. Para ello, dichas células a menudo se encapsulan dentro de hidrogeles: polímeros blandos y gelatinosos que absorben grandes cantidades de agua, aunque lo bastante viscosos como para conservar su forma, al menos temporalmente. Las células también pueden suspenderse en solución, como si fueran partículas de pigmento en una tinta de impresora. Estas «biotintas» se pulverizan a través de boquillas de inyección o son extruidas sobre una base, y pueden solidificarse variando la temperatura o la presión, añadiendo ciertas sustancias o exponiéndolas a una luz de una determinada longitud de onda. Una vez modelada adecuadamente la estructura, se agregan nutrientes y factores de crecimiento para favorecer que las células se desarrollen y formen el tipo de tejido deseado.

Los investigadores están combinando distintas técnicas para imprimir una amplia gama de tejidos. Los huesos crecen mejor sobre andamios de hidrogel, los cuales orientan y sirven de guía a las células encapsuladas en el polímero. El cartílago, en cambio, crece mejor cuando las células determinan su disposición por sí mismas, como hacen durante el desarrollo embrionario. En este caso, un andamio entorpecería el proceso: las células confinadas en el interior de un hidrogel no se comunican bien con las confinadas en otro y, por tanto, no transmiten las señales que causan un crecimiento conjunto que dé lugar a una porción mayor de tejido.

Junto con Yin Yu, de la Universidad Harvard, y otros investigadores, Ozbolat ha desarrollado una biotinta con base de alginato, un extracto de algas marinas.



BIOIMPRESIÓN de un modelo de tejido mediante una impresora 3D, en la Universidad estatal de Pensilvania.

PATRICK MANSELL/UNIVERSIDAD ESTATAL DE PENSILVANIA

Mediante extrusión, se moldea en forma de hebras finas la tinta que contiene las células de cartílago, las cuales crecen y se fusionan en una única porción de tejido. El investigador planea utilizar esta técnica con células pancreáticas para imprimir islotes de Langerhans (la parte del páncreas que produce insulina), que se destinarían a trasplantes en personas con diabetes de tipo 1. Además, su técnica funciona en animales vivos: mediante la adición de colágeno a la biotinta, consiguió fabricar hueso y piel en heridas craneales de ratas.

El cartílago bioimpreso podría superar tanto al tejido de donante como al plástico y el titanio empleados en las artroplastias de rodilla, afirma Darryl D'Lima, director de investigaciones ortopédicas en la Clínica Scripps de San Diego. Aunque las prótesis de rodilla de plástico y metal duran veinte años, no son tan elásticas como los tejidos vivos. «El metal, el plástico y el cemento son muy fuertes el día después de la operación, pero, a partir de entonces, no hacen más que debilitarse», observa D'Lima. Además, el cartílago impreso puede resultar más fuerte que los injertos de tejido donado. Por un lado, el tejido se imprimiría con la forma de la zona dañada, lo que evitaría la necesidad de cortar tejido sano. Por otro, la biotinta debería rellenar las minúsculas grietas que resultarían imposibles de reparar mediante cirugía, lo cual conduciría a una mayor fortaleza general. No obstante, admite que se trata de pura especulación; la técnica todavía no está lista para poder realizar ensayos clínicos comparativos. Investigadores como D'Lima están experimentando con piezas impresas en animales de laboratorio, pero aún no han demostrado que estas sean superiores a los injertos estándar.

D'Lima ha investigado la impresión en 3D para los ojos, con el propósito de tratar la ceguera causada por el deterioro que sufre la retina al envejecer. En colaboración con K. E. Kador, de la Universidad de California en San Diego, Jeffrey Goldberg, oftalmólogo de la Universidad Stanford, y otros científicos, imprimió células ganglionares de la retina sobre andamios para determinar si podían desarrollar retinas. Puesto que las células ganglionares son neuronas, necesitan crecer con una cierta orientación. «Buscamos que sus axones apunten y crezcan en una dirección específica, pues queremos que alcancen su destino», explica Goldberg. Los axones deben prolongarse por el nervio óptico para conectar la retina con el cerebro. Para lograrlo, D'Lima y Goldberg crearon un andamio con un patrón radial que imita la dirección de las fibras nerviosas en los ojos y luego imprimieron las células a lo largo de las líneas radiales. Los hidrogeles utilizados, que eran ricos en laminina (una proteína fibrosa) y contenían una pequeña cantidad de alginato, ayudaron a anclar las células retinianas, de modo que sus mecanismos naturales de señalización promovieran el crecimiento con la orientación correcta. Los investigadores crearon estructuras con un 72 por ciento de los axones orientados radialmente, frente a solo el 11 por ciento de aquellos cultivados en una placa (es decir, en 2D).



UN CARTÍLAGO MOLDEADO en forma de oreja podría convertirse en uno de los primeros tejidos bioimpresos aptos para uso clínico.

ANTHONY ATALA/INSTITUTO DE MEDICINA REGENERATIVA DE WAKE FOREST

Una de las ventajas que ofrece la bioimpresión para generar retinas es la especificidad. La retina contiene dos tipos de fotorreceptores: bastones y conos. Los primeros se concentran en los bordes; los segundos, en el centro. La bioimpresión proporciona un control preciso de su localización. «Ninguna otra técnica podría conseguir esto», asegura Goldberg, que opina que probablemente pasarán varios años antes de que estas retinas impresas puedan ensayarse en trasplantes. Las células nerviosas, además, plantean otro desafío: se hallan más densamente empaquetadas que, por ejemplo, las de cartílago; pero los investigadores aún no están seguros de cómo obtener tal densidad.

Una de las líneas de investigación en este campo se ocupa del desarrollo de mejores biotintas. Cada material ofrece unas propiedades únicas, que afectan a la facilidad de impresión, la conservación de la forma o el fomento del crecimiento celular. Una tinta ideal debería permanecer en estado líquido para facilitar su manejo y, a su vez, poder convertirse rápidamente en una estructura más sólida, de tipo gel, sin tener que recurrir a ciertas sustancias o fuertes dosis de radiación que pudieran dañar las células. «Probablemente la principal limitación actual de la bioimpresión se encuentra en la disponibilidad de biotintas», indica el químico Adam Perriman, de la Universidad de Bristol. Perriman ha desarrollado una biotinta mediante la combinación de alginato con un hidrogel llamado Pluronic (compuesto por distintos poloxámeros). Esta mezcla permite efectuar un ajuste fino del tiempo de gelificación: las estructuras de Pluronic mantienen bien su forma, pero se derriten con excesiva facilidad al variar la temperatura, mientras que el alginato gelifica con demasiada rapidez. Con la tinta mixta del grupo de Perriman se imprime primero la estructura deseada y luego, una vez solidificada, se retira, mediante lavado, el Pluronic, con la ventaja adicional de que el gel deja una red de microporos que posibilitan la absorción de nutrientes por el tejido impreso.

El ingeniero Dong-Woo Cho, de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Pohang en Gyeongbuk (Corea del Sur), ha adoptado otro enfoque: obtiene una biotinta a partir de la matriz extracelular. El proceso consiste en lavar tejidos cardíacos, cartílagos o grasas para eliminar cualquier traza de células y dejar solo la matriz extracelular, la cual se compone de sustancias como colágeno y glicosaminoglicanos. A continuación, este material se tritura y luego se mezcla con ácido acético e hidróxido sódico para producir la tinta; mediante extrusión, esta se moldea en forma de filamentos, los cuales gelifican cuando se calientan hasta alcanzar la temperatura corporal. Cho piensa que el hecho de que esta biotinta provenga de la matriz en la que viven las células brindará un ambiente más natural para que estas prosperen; ofrecerá una mayor biocompatibilidad que las tintas fabricadas con materiales que no se encuentran habitualmente en el cuerpo. En la actualidad la usa para desarrollar parches que podrían servir para reparar daños cardíacos.

Anthony Atala, director del Instituto de Medicina Regenerativa de Wake Forest, en

Winston-Salem (Carolina del Norte), piensa que las impresiones en 3D de tejidos más simples podrían tener uso clínico en los próximos años. Cabe suponer que el cartílago será el primero en estar disponible, pues se trata de una estructura relativamente plana que contiene pocos tipos de células y no requiere aporte sanguíneo. Atala ya ha imprimido cartílagos y huesos, que ha trasplantado luego en ratones. En humanos, al cartílago le seguirían tubos huecos, como una arteria o la uretra, y, más tarde, órganos huecos, como la vejiga. «Todos los tejidos son complejos, desde luego, pero las estructuras planas como la piel lo son menos», indica Atala.

En un órgano sólido, sin embargo, puede existir más de una docena de tipos de células y se precisa un sistema vascular para transportar nutrientes hasta ellas. Las células que se encuentran a más de 200 micrómetros (en torno al doble del grosor de un cabello humano) de una fuente de nutrientes mueren rápidamente, por lo que se requiere construir un sistema vascular realista si los investigadores quieren fabricar con éxito un órgano humano.

Un equipo de la Universidad Harvard, encabezado por David B. Kolesky, ya ha dado los primeros pasos para superar tal obstáculo: ha imprimido un tejido grueso con un rudimentario sistema vascular que se mantiene activo durante semanas. Los investigadores utilizaron tres tintas diferentes: silicona para otorgarle una forma básica; una biotinta infundida de células madre pluripotentes que generarían el tejido; y Pluronic, el cual se presenta en estado de gel a temperatura ambiente y líquido cuando se enfría. Imprimieron el tejido, usando el Pluronic para crear hebras por toda su extensión; tras la impresión, enfriaron la estructura a 4 ºC y, a continuación, extrajeron el líquido para labrar los canales a través de los cuales pudieran circular los nutrientes.

Mediante ese proceso, el grupo de Harvard logró imprimir tejidos de un centímetro de espesor que se conservaron vivos durante más de seis semanas. Este tiempo fue suficiente para que las células madre formaran una membrana de fosfato de calcio, la base sobre la cual crece el hueso. «Realmente no existe ninguna limitación. Podríamos aumentar el espesor», afirma Jennifer Lewis, la bioingeniera que dirigió la investigación. En este caso, el rudimentario sistema vascular constaba tan solo de un conjunto de canales entrecruzados en capas sucesivas, pero Lewis señala que los órganos reales requerirán un patrón más complejo de venas y capilares de distintos tamaños.

Además, la bioimpresión entraña un potencial que no se limita a la sustitución de órganos dañados. Ozbolat piensa en la posibilidad de mejorar el cuerpo humano con nuevos tipos de tejido. Su laboratorio ha llevado a cabo estudios preliminares encaminados a la creación de un órgano capaz de convertir la energía química en electricidad (una versión humana de lo que puede hacer una anguila eléctrica). Una persona podría tener incorporada su propia batería recargable, que le permitiría hacer funcionar cualquier dispositivo, desde un marcapasos hasta un miembro protésico.

Al margen de la posibilidad de imprimir partes del cuerpo que nos doten de capacidades sobrehumanas, la bioimpresión promete escribir un nuevo capítulo de la medicina. ¿Cuántas vidas podrán salvarse y cuántos cuerpos podrán mejorarse cuando sea posible imprimir una provisión ilimitada de repuestos?

—Neil Savage es periodista científico especializado en tecnología

Artículo original publicado en *Nature* vol. 540, págs. S56-S57, 2016. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2016

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Three-dimensional bioprinting using self-assembling scalable scaffold-free «tissue strands» as a new bioink. Y. Yu et al. en *Scientific Reports*, n.º 6, art. 28714, 2016.
Control of retinal ganglion cell positioning and neurite growth: Combining 3D printing with radial electrospun scaffolds. K. E. Kador et al. en *Tissue Engineering Part A*, vol. 22, págs. 286-294, 2016.
Three-dimensional bioprinting of thick vascularized tissues. David B. Kolesky en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 113, págs. 3179-3184, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Avances en medicina regenerativa. Ferris Jabr, Christine Gorman y Katherine Harmon en *IyC*, junio de 2013.
Imprimir lo imposible. Larry Greenemeier en *IyC*, agosto de 2013.
¿Imprimiremos casas en el espacio? Joaquim Minguella Canela en *IyC*, enero de 2015.

QUÍMICA

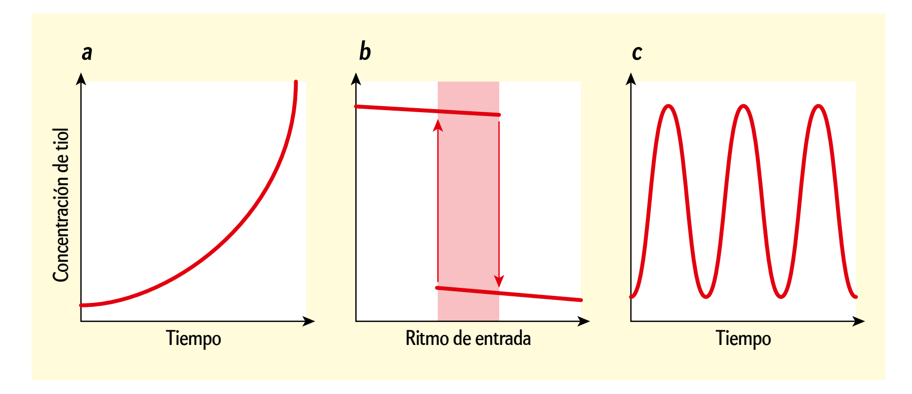
Complejidad emergente en un sistema de pequeñas moléculas orgánicas

Observan comportamientos dinámicos y complejos en una red de reacciones con importancia biológica entre pequeños compuestos orgánicos autocatalíticos

ANNETTE F. TAYLOR

Una de las principales características de la vida es su capacidad de autorreplicación a todos los niveles, desde moléculas individuales hasta organismos enteros. Los primeros replicantes moleculares prebióticos probablemente eran similares al ARN, pero puede que otros autorreplicantes no genéticos desempeñaran también un papel en la aparición de la vida. En un artículo publicado en la revista *Nature* en septiembre de 2016, Sergey. N. Semenov, de la Universidad Harvard, y sus colaboradores han descrito la autorreplicación de una molécula orgánica pequeña en un proceso autocatalítico, una reacción que produce sus propios catalizadores. En este trabajo, los autores muestran un sistema con capacidad de presentar respuestas complejas, no lineales, a los cambios en las condiciones del entorno. Se trata del primer ejemplo experimental de autocatálisis y comportamiento complejo en una red de reacciones que contiene únicamente com-

puestos orgánicos simples con importancia biológica.



PATRONES EMERGENTES: Se ha diseñado una red de reacciones entre moléculas orgánicas pequeñas que presenta comportamientos emergentes de gran importancia para la biología. El sistema se basa en un proceso autocatalítico en el que una molécula de tiol cataliza su propia formación. Si se suministra un flujo constante de «combustible», se produce un rápido aumento de la concentración de tiol (*a*). Pero si se añaden cierto tipo de reacciones, la red muestra otros comportamientos. Cuando se introduce una reacción que destruye el tiol, el sistema actúa como un interruptor biestable (*b*). Si el ritmo de entrada de flujo se mantiene dentro de un intervalo determinado (*zona sombreada*), se observan dos estados estables: uno con la concentración de tiol elevada y otro con la concentración baja. El sistema alterna entre estos estados (*la alternancia se indica mediante las flechas*) a los ritmos de entrada correspondientes a cada uno de los extremos de la región sombreada. Si en lugar de la reacción que destruye el tiol se añade otra que inhibe su formación, la concentración del mismo se torna oscilante (*c*).

© NATURE

Antecedentes

Ya en el año 1910 aparecieron modelos de sistemas biológicos relacionados con la autocatálisis. Se propusieron para explicar las oscilaciones en la dinámica poblacional, el origen de la homoquiralidad (la lateralidad en exclusiva de ciertas moléculas biológicas, como los aminoácidos) y la morfogénesis en sistemas celulares. En 1953, el físico Charles Frank afirmó que «una demostración en el laboratorio podría ser posible». Sin embargo, resultó difícil encontrar reacciones químicas que fueran autocalíticas y pudieran reemplazar los procesos artificiales (y en ocasiones imposibles) sugeridos en dichos modelos biológicos.

En los años cincuenta del siglo xx la investigación dio un paso de gigante cuando el químico Boris Belousov descubrió oscilaciones en un sistema químico mientras intentaba crear un análogo inorgánico del ciclo de Krebs, una cascada de reacciones metabólicas fundamental en biología. Desde entonces, se han construido numerosas redes de reacción autocatalíticas utilizando moléculas inorgánicas pequeñas. También se han descrito ejemplos de autocatálisis relacionados con replicantes orgánicos de gran tamaño como enzimas, péptidos e incluso ADN. El trabajo de Semenov y sus colaboradores aporta un eslabón perdido entre los sistemas macromoleculares y los sistemas inorgánicos de molécula pequeña.

La autocatálisis como punto de partida

Las reflexiones acerca del papel desempeñado por la autocatálisis en el origen de la vida suelen centrarse en la formación de polímeros autorreplicantes portadores de información, generados a partir de los «bloques de construcción» fundamentales existentes en la Tierra prebiótica. Sin embargo, el artículo de Semenov y sus colaboradores no se centra en la formación de dichas moléculas complejas, sino en la aparición de comportamientos complejos en reacciones de importancia biológica.

Su red de reacciones autocatalíticas incluye tioésteres y tioles, moléculas orgánicas de pequeño tamaño que contienen sulfuro. Las transformaciones en las que dichos compuestos participan son relevantes en procesos biológicos como el metabolismo, y los tioésteres han sido relacionados previamente con ciclos metabólicos primitivos. El volumen de los productos del metabolismo oscila con frecuencia a causa de la autocatálisis en reacciones catalizadas por enzimas. El presente artículo resulta especialmente interesante, dado que demuestra una ruta hacia la autocatálisis en redes de moléculas orgánicas pequeñas, sin necesidad de enzimas.

El producto de una reacción química puede actuar como autocatalizador uniéndose a una molécula de reactante y facilitando la transformación del reactante en producto. A continuación se libera el autocatalizador original junto con una copia de sí mismo. En el sistema autocatalítico de Semenov y sus colaboradores, una molécula de tiol se convierte en dos, dos se convierten en cuatro y así sucesivamente, lo que conlleva un rápido aumento de los tioles. Con el tiempo, este proceso consume por completo el reactante, y la reacción alcanza el equilibrio termodinámico, un estado que resultaría mortal para un sistema vivo. Sin embargo, los autores han logrado mantener el sistema alejado del equilibrio, en un dispositivo microfluídico, mediante la aportación continua de tioésteres (las moléculas que reaccionan con los tioles en el proceso autocatalítico). También han diseñado reacciones en las que se destruyen los productos o en las que se inhibe la autocatálisis.

Cuando Semenov y su equipo combinaron los procesos de autocatálisis, inhibición y destrucción, aparecieron comportamientos funcionales muy comunes en organismos vivos: el sistema o bien actuaba como un interruptor biestable, adoptando uno de dos estados (poca formación de producto o mucha formación de producto) o bien oscilaba entre los dos. El influjo de reactantes controla la aparición de uno u otro comportamiento. El interruptor biestable tiene una «memoria» inherente, ya que el estado adoptado depende de si el influjo aumenta o disminuye.

De la química a la biología

Tal y como detalló J. J. Tyson en su trabajo publicado en 2003 en la revista *Current Opinion in Cell Biology,* los interruptores y los osciladores guardan relación con numerosos procesos celulares esenciales. La transición brusca entre un estado «apagado» (poca formación de productos) y uno «encendido» (mucha formación de productos) permite a las células procesar información, como por ejemplo señales del entorno, en un modo que recuerda al procesamiento de la información digital. La autocatálisis también está relacionada con la transición del comportamiento de una única célula a la cooperación multicelular. Por ejemplo, organismos como los mohos mucilaginosos y las bacterias se sirven de pulsos de autocatalizadores para sincronizar la actividad de toda una población.

Una de las características fascinantes de los sistemas autocatalíticos es su capacidad de autoorganización espacial. Por

ejemplo, cuando la reacción de oscilación de Belousov (actualmente conocida como la reacción de Belousov-Zhabotinsky) se constriñe a una fina capa de agua en una placa de Petri, se forman y propagan espontáneamente bellas estructuras en espiral, muy parecidas a las ondas de actividad que emiten los cultivos de mohos mucilaginosos con el fin de encontrar alimento.

Sin embargo, todavía nos hallamos muy lejos de poder colocar un conjunto de compuestos químicos en una placa de Petri y observar cómo se autoorganizan en algo que pudiera considerarse vivo. La organización espacial de la información química, sobre todo en el interior de las células, será fundamental para esta transición. Las paredes celulares que separan a los organismos vivos del entorno también controlan la entrada de alimentos y de información química. Dicha información suele procesarse en una red de reacciones que incluyen moléculas enzimáticas de gran tamaño, alojadas en la célula. Es difícil imaginarse cómo podría confinarse en las células el sistema autocatalítico de Semenov y sus colaboradores, dado que cualquier pared celular que fuera permeable al combustible del tioéster lo sería también, probablemente, a todos los demás componentes de la red de reacciones. Se trata de un reto técnico que deberá superarse antes de que la reacción de los autores pueda considerarse parte de cualquier secuencia potencial de acontecimientos que conduzcan a la aparición de vida.

En consecuencia, nuestra búsqueda de moléculas que se autoorganicen en sistemas vivos continúa, impulsada tanto por la pregunta acerca de cómo se originó la vida como por el deseo de crear vida artificial en el laboratorio. La red de reacciones autocatalíticas de Semenov y sus colaboradores aporta nueva luz al diseño de sistemas fuera del equilibrio que presentan parte de la funcionalidad que emerge a partir de la autocatálisis en los procesos biológicos. Sería interesante aunar la capacidad de procesar información que poseen las moléculas pequeñas en dicha red con las de mayor tamaño portadoras de información, como los ácidos nucleicos. Esta aproximación «de abajo hacia arriba» contribuirá al diseño de respuestas «inteligentes» en sistemas químicos sintéticos a partir de los cuales puede generarse vida. Aunque no necesariamente tal como la conocemos.

—Annette F. Taylor
Departamento de ingeniería química y biológica
Universidad de Sheffield

Artículo original publicado en *Nature* vol. 537, págs. 627-628, 2016.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2016

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Contribution to the theory of periodic reactions. A. J. Lotka en *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 14, págs. 271-274, 1910.
Sniffers, buzzers, toggles and blinkers: Dynamics of regulatory and signaling pathways in the cell. J. J. Tyson et al. en *Current Opinion in Cell Biology*, vol. 15, págs. 221-231, 2003.
Autocatalytic, bistable, oscillatory networks of biologically relevant organic reactions. S. N. Semenov et al. en *Nature*, vol. 537, págs. 656-660, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Reacciones químicas oscilantes. Irving R. Epstein et al. en *IyC*, mayo 1983.
La morfogénesis según Alan Turing. John Reinitz en *IyC*, junio 2012.

GENÉTICA

Las huellas nucleosómicas, un nuevo nivel de información en el ADN

Determinan la posición de los nucleosomas que empaquetan el genoma y son independientes de la información codificada por los genes

FRANCISCO ANTEQUERA

El ADN contiene la información genética que dirige el desarrollo de los organismos y regula las funciones vitales. La longitud de la molécula de ADN supera en muchos órdenes de magnitud las dimensiones del núcleo celular, por lo que debe compactarse enormemente y de forma muy precisa para poder acomodarse en su interior.

Este empaquetamiento resulta posible gracias a la asociación del ADN con ciertas proteínas estructurales, llamadas histonas, en la fibra de cromatina. Las unidades fundamentales de la cromatina son los nucleosomas, complejos de ocho histonas sobre los que se enrolla un fragmento de ADN de cadena doble. Dicho fragmento está formado por 147 nucleótidos y se denomina ADN mononucleosómico. La mayoría de los nucleosomas ocupa posiciones muy estables a lo largo del genoma. Esta ubicación precisa resulta esencial porque determina la accesibilidad al ADN de las proteínas que regulan su transcripción y otras funciones.

Se sabía que la estabilidad y la dinámica de los nucleosomas dependen, en parte, de los complejos remodeladores de cromatina, un conjunto de proteínas que tiene la capacidad de reposicionar los nucleosomas. Se ha comprobado asimismo que los factores de transcripción participan también en la organización de la cromatina.

En comparación con el papel bien establecido de los remodeladores y de los factores de transcripción, la contribución de la secuencia del ADN al posicionamiento de los nucleosomas resulta más controvertida. Varios grupos de investigación han descrito que la distribución de algunos dinucleótidos (dos nucleótidos consecutivos en una de las dos hebras del ADN) en el ADN de un nucleosoma, en concreto los de adenina y timina y los de citosina y guanina (los cuatro componentes fundamentales del ADN), favorece la torsión alrededor del octámero de histonas. Ninguno de esos estudios, sin embargo, ha detectado elementos capaces de conducir los nucleosomas hasta las regiones que ocupan a lo largo del genoma. En nuestro laboratorio nos propusimos descifrar ese código de información adicional del ADN que determina la posición de los nucleo-

somas, así como averiguar el modo en que esa información influye en la expresión de los genes.

Identificación de las huellas

Aprovechando que las levaduras son los organismos en los que se ha determinado con mayor resolución la distribución de los nucleosomas en el genoma, iniciamos la búsqueda de las señales que dirigen su ubicación en la levadura *Schizosaccharomyces pombe*. Analizamos unas 40.000 secuencias de ADN asociadas a nucleosomas que ocupaban posiciones muy estables en el genoma. A continuación, calculamos la proporción de cada uno de los cuatro nucleótidos en las 147 posiciones del ADN mononucleosómico y obtuvimos una distribución muy bien definida y diferente para cada nucleótido. Por otro lado, el análisis del mismo número de secuencias de *S. pombe* de la misma longitud pero seleccionadas al azar generó distribuciones homogéneas coincidentes con la frecuencia de cada nucleótido en el genoma. Ello demostraba que la distribución singular hallada de los nucleótidos aparecía solo en las secuencias del ADN enrollado sobre los octámeros de histonas. Denominamos huellas nucleosómicas (*nucleosomal signatures*) al patrón promedio de distribución de los cuatro nucleótidos a lo largo del ADN que está asociado a un nucleosoma.

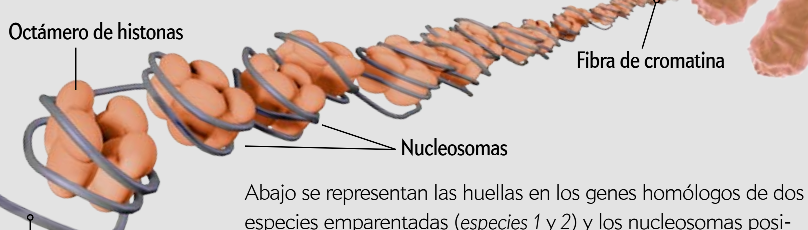
Para investigar si tales huellas estaban presentes también en otros genomas, realizamos el mismo análisis en varias especies de levaduras y observamos que, además de existir, adoptaban una forma diferente en cada una de ellas, a pesar de la gran conservación de las histonas en las distintas especies.

Con estas observaciones nos preguntamos cuál era el origen de estas señales y si desempeñaban alguna función biológica. En particular, nos interesaba saber si la información contenida en ellas contribuiría a que los nucleosomas ocupasen posiciones específicas en el genoma. Para resolver esa incógnita era necesario distinguir si las huellas nucleosómicas existían como consecuencia del posicionamiento de los nucleosomas en el genoma o eran ellas las que causaban o dirigían ese posicionamiento.

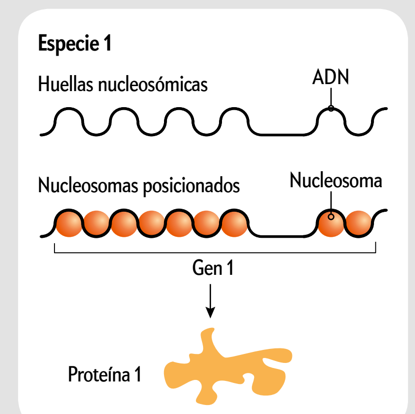
Cada una de esas dos hipótesis hacía predicciones diferentes respecto a la relación de causalidad entre las huellas nucleosómicas y la localización de los nucleosomas, que analizamos experimentalmente en nuestro laboratorio. En el primer caso, si la información del ADN

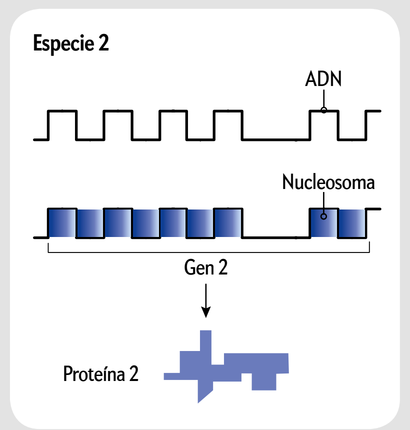
UNA INFORMACIÓN FLEXIBLE

Además de la información de los genes, el ADN contiene un código adicional que determina la posición de los nucleosomas a lo largo del genoma: las huellas nucleosómicas. Estas corresponden a un patrón de distribución de los cuatro nucleótidos (adenina, timina, citosina y guanina) en el ADN que se enrolla alrededor de los octámeros de histonas y que constituyen los nucleosomas, las unidades fundamentales de la cromatina.

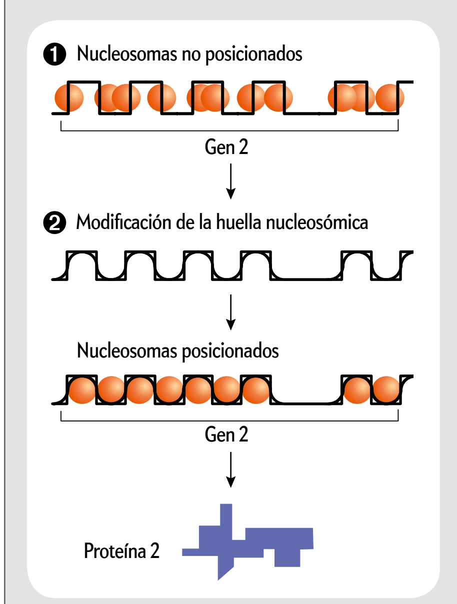


Abajo se representan las huellas en los genes homólogos de dos especies emparentadas (*especies 1* y *2*) y los nucleosomas posicionados en cada una de las huellas. La ubicación correcta de los nucleosomas permite el acceso normal de la maquinaria de transcripción de los genes y la síntesis de las proteínas codificadas por cada gen (*proteínas 1* y *2*).





En una serie de experimentos se ha comprobado que las huellas nucleosómicas representan un nivel de información flexible.



❶ Cuando se introduce la secuencia del gen de la especie 2 en su lugar correspondiente en el ADN de la especie 1, los nucleosomas de la especie 1 adoptan un patrón irregular (nucleosomas no posicionados), puesto que la secuencia todavía conserva la huella nucleosómica de la especie 2 (su distribución particular de nucleótidos). Esto puede generar alteraciones en la expresión del gen o en la estabilidad de su secuencia.

❷ Pero si se modifica el gen 2 para que incorpore la información de la huella nucleosómica de la especie 1 mediante el uso de codones sinónimos, se restaura la organización nucleosómica de la especie 1, a la vez que se produce la proteína 2.



no contribuyese a la organización de los nucleosomas, esta última no variaría al modificar las secuencias asociadas a ellos. En el segundo caso, si la secuencia contribuyera al posicionamiento, existiría la posibilidad de diseñar, a partir de la información conocida de las huellas nucleosómicas, secuencias de ADN artificiales con capacidad para dirigir los nucleosomas a posiciones específicas del genoma.

Funcionamiento de las huellas

Para analizar la primera hipótesis, sintetizamos varios fragmentos de ADN mononucleosómico en los que cambiamos el orden de los nucleótidos respecto a las secuencias nativas y, a continuación, reemplazamos tales secuencias por los fragmentos artificiales. A continuación, se digirió la cromatina con una enzima (nucleasa micrococal) que corta las regiones entre los nucleosomas y permite identificar el posicionamiento de estos en genes específicos o en el genoma entero. El resultado fue una alteración de la distribución de los nucleosomas que coincidía exactamente con las zonas modificadas y que tenía lugar tanto en regiones transcritas (codificantes y no codificantes) como no transcritas. Ello sugería que habíamos eliminado algún tipo de información necesaria para el posicionamiento y que, por lo tanto, la secuencia parecía contribuir al mismo. A pesar de ello, no podíamos concluir que esa información estuviese codificada en las huellas nucleosómicas.

Con el fin de poner a prueba la segunda hipótesis, incorporamos información derivada de las huellas nucleosómicas de *S. pombe* y *S. cerevisiae* en moléculas de ADN artificiales no codificantes y las introdujimos en sus genomas. El análisis de las cepas resultantes reveló que los nucleosomas se situaban exactamente sobre las posiciones predichas en cada especie. Sin embargo, las mismas secuencias eran incapaces de posicionar los nucleosomas cuando estas se intercambiaban entre las dos levaduras. Tales resultados demostraban que las huellas nucleosómicas contenían información para dirigir la distribución de los nucleosomas y que, además, esa información era exclusiva de cada especie, ya que no era interpretada correctamente por los nucleosomas de otras especies.

Las huellas nucleosómicas no solo están definidas por la secuencia en sí del ADN mononucleosómico, sino también por la distribución promedio de los cuatro nucleótidos a lo largo de él. Ello permite generar muchas secuencias diferentes que mantienen la capacidad para dirigir el posicionamiento de los nucleosomas.

En principio, esa flexibilidad abría la posibilidad de modificar la secuencia de los genes de una especie para que adoptasen la organización nucleosómica de los de otra, al tiempo que mantenían su capacidad de codificación original. Esto se debe a que un mismo aminoácido puede estar codificado por distintos codones sinónimos (un codón corresponde a la combinación de tres nucleótidos; la mayoría de los 20 aminoácidos existentes pueden estar codificados por 2, 3, 4 o 6 codones sinónimos). Para explorar esa posibilidad sustituimos los codones de tres genes (dos eucarióticos y uno de origen procariótico) por sus codones sinónimos y que tuvieran una composición de nucleótidos parecida a la definida por las huellas nucleosómicas de *S. pombe* y *S. cerevisiae*. Los resultados que obtuvimos al integrarlos en sus genomas revelaron que, efectivamente, los genes de un organismo, incluso los de origen procariótico, pueden modificarse para que adopten una organización nucleosómica indistinguible de los del genoma de la especie en la que se integren.

Las huellas nucleosómicas representan, pues, un nuevo nivel de información del ADN que ofrece la posibilidad de diseñar moléculas de ADN capaces de especificar la organización básica del genoma. Será interesante explorar su posible aplicación al diseño de genes y vectores de interés biotecnológico, como una herramienta para valorar la expresión y estabilidad de estos. A mayor escala, también podrían ser relevantes en el diseño de genomas sintéticos y en el campo emergente de la ingeniería de la cromatina.

—Francisco Antequera
Instituto de Biología Funcional y Genómica
CSIC/Universidad de Salamanca

PARA SABER MÁS

Chromatin regulation at the frontier of synthetic biology. A. J. Keung et al. en *Nature Reviews Genetics*, vol. 16, págs. 159-171, 2015.

A species-specific nucleosomal signature defines a periodic distribution of amino acids in proteins. L. Quintales et al. en *Open Biology*, vol. 5, n.º 4, pág. 140.218, abril de 2015.

Nucleosomal signatures impose nucleosome positioning in coding and non-coding sequences in the genome. S. González et al. en *Genome Research*, vol. 26, págs. 1532-1543, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

El papel clave de las histonas. R. González Romero et al. en *IyC*, diciembre de 2011.

Larga vida al Hubble

Los datos del telescopio espacial seguirán siendo fuente de descubrimientos mucho después de que el instrumento haya dejado de funcionar

KATHIE PEEK

El telescopio espacial Hubble seguirá ofreciéndonos impresionantes imágenes del cosmos durante varios años. Sin embargo, dado que la NASA ha dejado de efectuar labores de mantenimiento, se espera que pase a mejor vida en algún momento después de 2020. Pero eso no significa que sus descubrimientos vayan a acabarse entonces: la agencia conserva un gran archivo público de datos reunidos durante la vida del observatorio (que entró en funcionamiento en 1991), el cual ya ha propiciado el hallazgo de nebulosas y galaxias lejanas. «Es un tesoro que podrá explotarse en el futuro», señala Arfon Smith, que dirige una nueva iniciativa de ciencia de datos en el Instituto para la Ciencia del Telescopio Espacial, el centro de operaciones del Hubble. «Los datos son increíblemente valiosos y asombrosamente útiles aún.» El archivo da testimonio del imperecedero valor de la investigación básica a gran escala: la información que contiene podrá aprovecharse de formas que los astrónomos aún no imaginan.

Cómo leer el diagrama

Cada punto representa una observación del Hubble documentada en un artículo publicado.

Los puntos azules (casi 14.000) se refieren al archivo del Hubble: en vez de buscar nuevos datos, el investigador aborda un problema gracias a imágenes ya existentes.

Los puntos anaranjados (casi 9000) indican datos nuevos: un investigador realiza una observación específica para abordar un problema determinado.

Otros 10.000 resultados (no incluidos aquí) se basan en una mezcla de observaciones nuevas y de archivo. Los datos están actualizados hasta principios de diciembre de 2016.

Tiempo desde la observación

20 años

15

10

5

0

5

10

15

20

25

Fecha de publicación: 1995 2000 2005 2010 2015

Las primeras observaciones del Hubble siguen ofreciendo nuevos resultados 26 años después.

Las imágenes del Hubble pueden ser tan bellas como útiles. Esta fotografía de la galaxia del Remolino, tomada en 2005, sirvió para identificar la estrella cuya explosión en forma de supernova se observó en 2011.

Una sola fotografía puede ofrecer muchos resultados. El Campo Profundo del Hubble (una única imagen que acumula más de cien horas de exposición y que muestra numerosas galaxias remotas) ha generado casi 200 artículos desde 1995.

Las interrupciones temporales por trabajos de mantenimiento reducen las observaciones. Este hueco diagonal coincide con una misión de mantenimiento efectuada por astronautas de 2009.

Una vez que el Hubble haya dejado de funcionar, desaparecerán los resultados basados en datos nuevos (*naranja*), pero seguirán produciéndose nuevos hallazgos gracias al archivo (*azul*).

Número de observaciones al año documentadas en artículos

1000

500

0

500

KATIE PEEK (*gráfico*); FUENTE: ARCHIVO DE TELESCOPIOS ESPACIALES BARBARA A. MIKULSKI, INSTITUTO PARA LA CIENCIA DEL TELESCOPIO ESPACIAL (*datos*); EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE (STSCI/AURA) (*galaxia*)

EXPLORACIÓN ESPACIAL

MISIÓN A ALFA CENTAURI

Un plan financiado por un multimillonario pretende enviar pequeñas sondas espaciales a una estrella cercana. ¿Es viable?

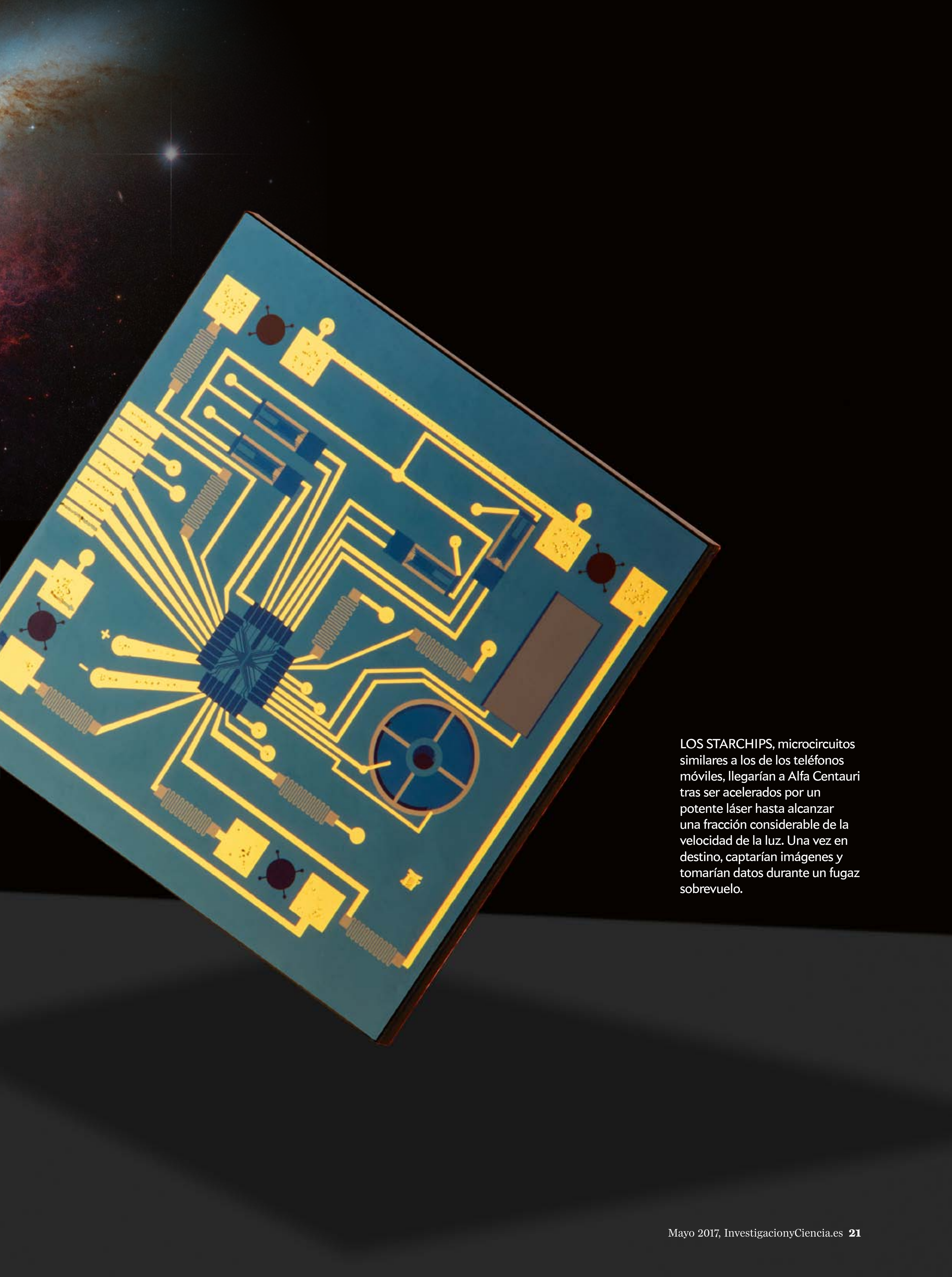
Ann Finkbeiner

EN SÍNTESIS

Yuri Milner, un multimillonario de Silicon Valley, ha decidido invertir en un audaz proyecto para enviar sondas diminutas a Alfa Centauri, el sistema estelar más cercano al Sol.

La misión, llamada Breakthrough Starshot, pretende usar láseres para acelerar una flota de microchips al 20 por ciento de la velocidad de la luz. Las naves tardarían 20 años en llegar.

El proyecto cuenta con el asesoramiento de numerosos ingenieros y científicos. No obstante, otros expertos opinan que es caro, arriesgado y dudan de su interés científico.



LOS STARCHIPS, microcircuitos similares a los de los teléfonos móviles, llegarían a Alfa Centauri tras ser acelerados por un potente láser hasta alcanzar una fracción considerable de la velocidad de la luz. Una vez en destino, captarían imágenes y tomarían datos durante un fugaz sobrevuelo.

En la primavera de 2016 me encontré en una recepción con Freeman Dyson, el brillante físico y matemático, por entonces de 92 años y catedrático emérito del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Dyson nunca dice lo que uno espera oír, así que le pregunté qué había de nuevo. Esbozó su sonrisa ambigua y respondió: «Parece que vamos a Alfa Centauri». Alfa Centauri es el sistema estelar más cercano al Sol. Poco antes, un multimillonario de Silicon Valley había anunciado la financiación de un proyecto, Breakthrough Starshot, para enviar hasta allí algún tipo de nave espacial. «¿Es una buena idea?», inquirí. Dyson amplió su sonrisa y respondió:

«No, es una tontería». Y añadió:
«Pero la nave espacial es interesante».

Ann Finkbeiner es periodista científica especializada en astronomía, cosmología y la interacción entre ciencia y seguridad nacional. Su libro más reciente es *A grand and bold thing* (Free Press, 2010), sobre el Sondeo Digital del Cielo Sloan, un proyecto para confeccionar un gran mapa del cielo nocturno.



En efecto, la nave es interesante. En vez de usar un cohete normal, impulsado por combustible y lo bastante grande como para transportar seres humanos o instrumentos, el proyecto Starshot («Disparo Estelar») pretende enviar una flota de diminutos chips multifunción, bautizados StarChips. Cada uno de ellos iría acoplado a una «vela solar», la cual sería tan ligera que, al incidir sobre ella un potente haz láser, se aceleraría hasta alcanzar el 20 por ciento de la velocidad de la luz. Alfa Centauri, un sistema binario formado por estrellas similares al Sol (Alfa Centauri A y B), se encuentra a 4,37 años luz, por lo que el cohete más veloz tardaría 30.000 años en llegar. En cambio, los StarChips solo necesitarían 20 años. Una vez en su destino, las naves no se detendrían, sino que sobrevolarían las estrellas y sus posibles planetas en pocos minutos. Durante ese tiempo transmitirían imágenes y datos a la Tierra, los cuales tardarían otros 4,37 años en arribar.

La «tontería» es que no resulta obvio que el objetivo de la misión sea científico. Lo que los astrónomos desean saber sobre las estrellas no es algo que pueda aprenderse en un sobrevuelo fugaz. Y nadie sabe si Alfa Centauri posee planetas, por lo que Starshot ni siquiera puede prometer primeros planos de otros mundos. «Hemos pensado mucho menos en los aspectos científicos», reconoce Ed Turner, astrofísico de la Universidad de Princeton y miembro del comité asesor de Starshot. «Hemos dado casi por garantizado que la ciencia será interesante.»

Sin embargo, en agosto de 2016, Starshot recibió un golpe de suerte: un grupo europeo de astrónomos que nada tenía que ver con el proyecto anunció el hallazgo de un planeta alrededor de la estrella más cercana al Sol: Próxima Centauri, vecina de Alfa Centauri pero situada unos 0,1 años luz más cerca. De repente, Starshot se convirtió en la única forma semiviable de llegar a un exoplaneta en un futuro previsible. Con todo, el proyecto sigue recordando un poco a los sueños de esos fans de la ciencia ficción que hablan sin parar de enviar humanos fuera del sistema solar con técnicas que, seguramente, funcionarían si hubiese suficiente financiación y suficientes milagros tecnológicos.

No obstante, Starshot no necesita milagros. Su tecnología, aunque hoy inexistente, se basa en ingeniería consolidada y no viola ninguna ley física. Y hay dinero detrás del proyecto: Yuri Milner, el empresario que también financia otras investigaciones mediante el programa Breakthrough Initiatives y que cada año concede los cuantiosos premios científicos Breakthrough, ha puesto en marcha la idea con una aportación inicial de 100 millones de dólares. Al mismo tiempo, ha reclutado a un comité asesor lo suficientemente impactante como para convencer a cualquier escéptico de que Starshot podría tener éxito: expertos mundiales en láseres, velas solares, microcircuitos, exoplanetas, aeronáutica y dirección de grandes proyectos, además de dos premios nóbel, el astrónomo real del Reino Unido, eminentes astrofísicos del ámbito académico, experimentados ingenieros... y Dyson, que, por más que piense que la misión es absurda, también afirma que la idea de una vela solar impulsada por láseres tiene sentido y es digna de ser llevada a cabo. En conjunto, pocos apostarían a largo plazo contra una operación respaldada por tanto dinero y tantas mentes brillantes.

Con independencia de sus perspectivas, el proyecto se diferencia por completo de cualquier misión espacial efectuada hasta ahora. «Todo lo relativo a Starshot es insólito», asegura Joan Johnson-Freese, experta en política espacial de la Escuela de Guerra Naval de Estados Unidos. Sus objetivos, financiación y estructura directiva lo distinguen de todos los demás actores del sector. Las empresas espaciales persiguen beneficios y se centran en misiones tripuladas dentro del sistema solar. La NASA, que no planea ningún viaje interestelar, tiene demasiada aversión al riesgo para intentar algo tan incierto. Sus procedimientos burocráticos son a menudo engorrosos y redundantes, y sus misiones suelen depender de la aprobación de un Congreso inconsecuente. «La NASA necesita dedicarle tiempo; los multimillonarios pueden hacerlo sin más», asegura Leroy Chiao, antiguo astronauta y comandante de la Estación Espacial Internacional.

LA ESTRATEGIA

El impulsor de Starshot siempre se ha sentido inspirado por metas lejanas. Yuri Milner nació en 1961, el mismo año en que Yuri Gagarin se convertía en el primer ser humano en viajar al espacio. «Mis padres me mandaron un mensaje al ponerme Yuri», afirma, queriendo decir que estaba llamado a ir a algún lugar al que nadie hubiese llegado antes. Así que estudió física —«mi primer amor», aclara— y, tras diez años de formación, comenzó a trabajar en cromodinámica cuántica. «Por desgracia, no lo hice muy bien», confiesa. Después entró en el mundo de los negocios, se convirtió en uno de los primeros inversores de Facebook y Twitter y amasó una fortuna estimada en casi

PÁGINAS ANTERIORES: NASA/ESA/A. GOOBAR/UNIVERSIDAD DE ESTOCOLMO/EQUIPO DEL LEGADO DEL HUBBLE (STSCI/AURA) (*galaxia*); STAN MUSILEK (*fotografías*)

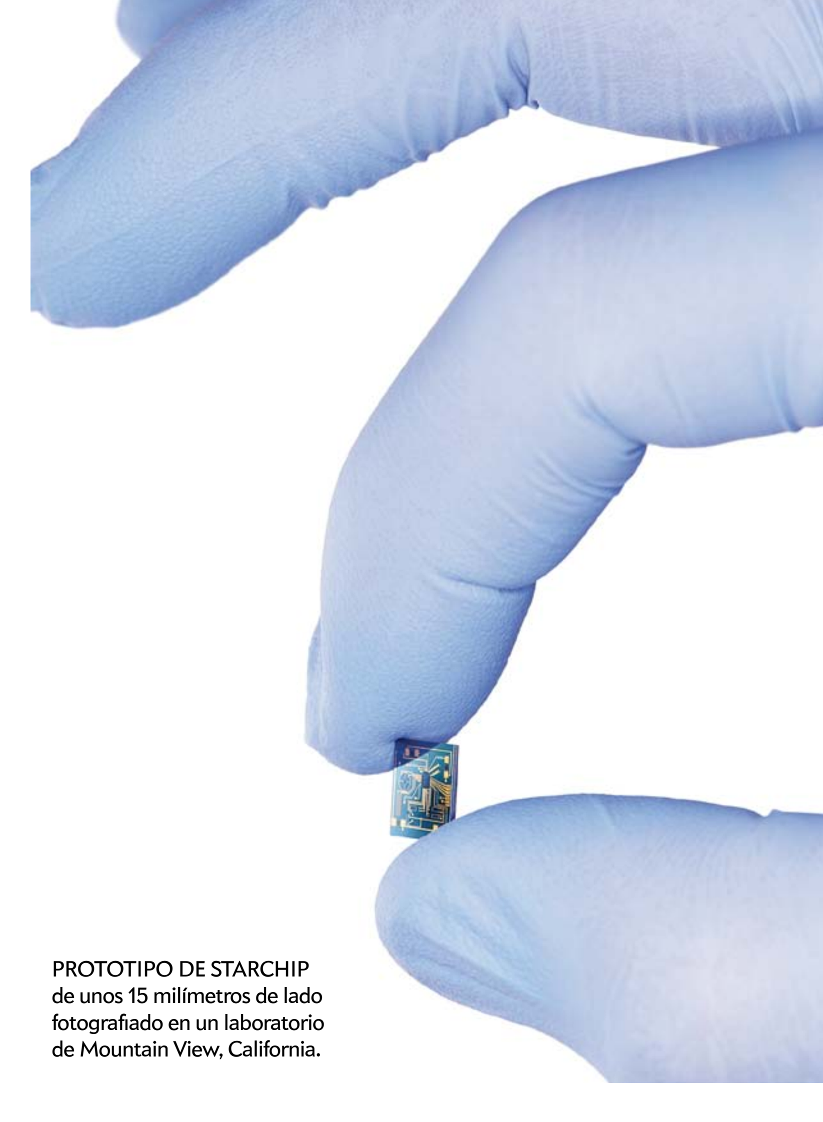
3000 millones de dólares. «Así que, hace unos cuatro años, comencé a pensar de nuevo en mi primer amor.»

En 2013 fundó los premios Breakthrough; uno en física fundamental, otro en ciencias de la vida y otro en matemáticas. Y en 2015 comenzó con lo que él califica como su pasatiempo, el programa Breakthrough Initiatives. Este viene a ser una especie de compromiso con el universo: un premio de un millón de dólares para el mejor mensaje dirigido a una civilización extraterrestre, 100 millones de dólares para una búsqueda más amplia y minuciosa de inteligencia alienígena, y, ahora, 100 millones de dólares para Starshot.

A principios de 2015, Milner reclutó al núcleo directivo de Starshot entre las personas que había conocido gracias a Breakthrough Initiatives. El presidente y el director ejecutivo del comité asesor son, respectivamente, Avi Loeb, director del departamento de astronomía de Harvard, y Pete Worden, quien dirigió el Centro de Investigación Ames de la NASA y que estuvo implicado en un plan de la NASA y de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados para la Defensa (DARPA) para lanzar una nave interestelar de aquí a cien años. Para el cargo de director de ingeniería, Worden enroló a Pete Klupar, ingeniero que había trabajado de manera intermitente en la industria aeroespacial y que en Ames había estado a su servicio. Ellos se encargaron de convocar a un espectacular comité de expertos en tecnologías clave que, aparentemente, estaban dispuestos a participar por poco o ningún dinero, así como a personalidades como Mark Zuckerberg o el cosmólogo Stephen Hawking. La gerencia de Starshot parece hallarse a medio camino entre el rigor jerárquico de la NASA y la cultura de Silicon Valley, consistente en reunir a un grupo de personas inteligentes en una sala, proponerles un objetivo a largo plazo y quedarse al margen. James Benford, miembro del comité y presidente de Microwave Sciences, lo explica así: «El encargo es darnos la semana que viene y cinco años de plazo y ya averiguaremos cómo conectarlos».

Una vez reunido, el equipo descartó por inverosímil la posibilidad de enviar seres humanos a Alfa Centauri y decidió concentrarse en una misión no tripulada que partiría de aquí a 20 años. Después concluyeron que el gran problema era la propulsión de la nave. Así que, a mediados de 2015, los doctorandos y los investigadores posdoctorales de Loeb comenzaron a clasificar las distintas opciones en imposible, improbable y factible. En diciembre de ese año, recibieron un artículo de Philip Lubin, físico de la Universidad de California en Santa Bárbara, titulado «Hoja de ruta para un viaje interestelar». La opción de Lubin consideraba una batería de láseres en fase: un gran número de pequeños láseres cuya luz se combinaría de forma coherente en un solo haz. Este impulsaría un chip transportado en una vela solar, la cual tendría que desplazarse a una fracción considerable de la velocidad de la luz para llegar a otra estrella en pocas décadas. (Una idea similar había sido publicada 30 años antes por el físico y escritor de ciencia ficción Robert Forward, quien la bautizó como Starwisp.) Aunque la tecnología necesaria era aún más ciencia ficción que realidad, Lubin asegura que, a grandes rasgos, aquello marcó la estrategia de Starshot. Tras ello, se unió al proyecto.

En enero de 2016, Worden, Klupar, Loeb y Lubin se reunieron con Milner en su casa de Silicon Valley. «Yuri apareció con un papel lleno de notas adhesivas y comenzó a hacer las preguntas científicas y económicas correctas», recuerda Lubin. Lo bueno de aquello era que, en lugar de someter el proyecto a un largo proceso de solicitud y revisión de propuestas, como habría hecho la NASA, o de preocuparse por los beneficios económicos, como haría una empresa, el equipo de Starshot tenía libertad para trazar un plan basándose en lo que mejor le pareciese.



PROTOTIPO DE STARCHIP de unos 15 milímetros de lado fotografiado en un laboratorio de Mountain View, California.

El único elemento verdaderamente costoso era el láser. Las velas y los chips serían baratos e incluso desechables: se agruparían en una lanzadera, se enviarían más allá de la atmósfera y se liberarían, uno a uno, cientos o miles de ellos; tantos que no supondría ningún drama perder unos pocos. El láser impactaría sobre cada uno y, en pocos minutos, lo aceleraría hasta alcanzar el 20 por ciento de la velocidad de la luz. A continuación, el láser se desactivaría y el chip y la vela emprenderían su camino. Una vez en la estrella, se comunicarían con la Tierra. «Hace diez años nunca hubiéramos hablado en serio de esto», apunta Milner. Pero hoy, con la mejora exponencial en láseres y microcircuitos y gracias los nuevos materiales, «no estamos a siglos de distancia, sino a unas docenas de años».

El equipo de Starshot sometió la idea a revisión externa y pidió a varios científicos que buscasen fallos. Nadie encontró ninguno. «Puedo explicarle por qué es difícil y por qué es caro, pero no por qué es imposible», señala Lubin. En abril de 2016 se llegó a un acuerdo sobre el sistema y, el día 12, Milner organizó una rueda de prensa en la Freedom Tower de Nueva York con vídeos, animaciones y varios miembros del comité asesor y anunció un velero interestelar impulsado por viento lumínico. Ese verano, los investigadores se dedicaron a esbozar lo que habría de ocurrir continuación.

CHIPS, VELAS Y LÁSERES

El equipo pronto descubrió que, aunque técnicamente factible, el plan se encontraba plagado de dificultades. Incluso el elemen-

Cómo visitar otra estrella

El proyecto Breakthrough Starshot planea enviar diminutas naves espaciales a Alfa Centauri, el sistema estelar más cercano al Sol. De tener éxito, la misión supondría el primer viaje interestelar de la humanidad. La idea se basa en emplear una batería de láseres para acelerar una flota de chips a una velocidad próxima a la de la luz, con lo que apenas tardarían 20 años en llegar a su destino. Para ser impulsados, los microcircuitos, llamados StarChips, viajarían sujetos a una «vela solar», una lámina ultrafina y muy reflectante. Al llegar, tomarían imágenes y datos durante un rápido sobrevuelo y enviarían esa información a la Tierra.

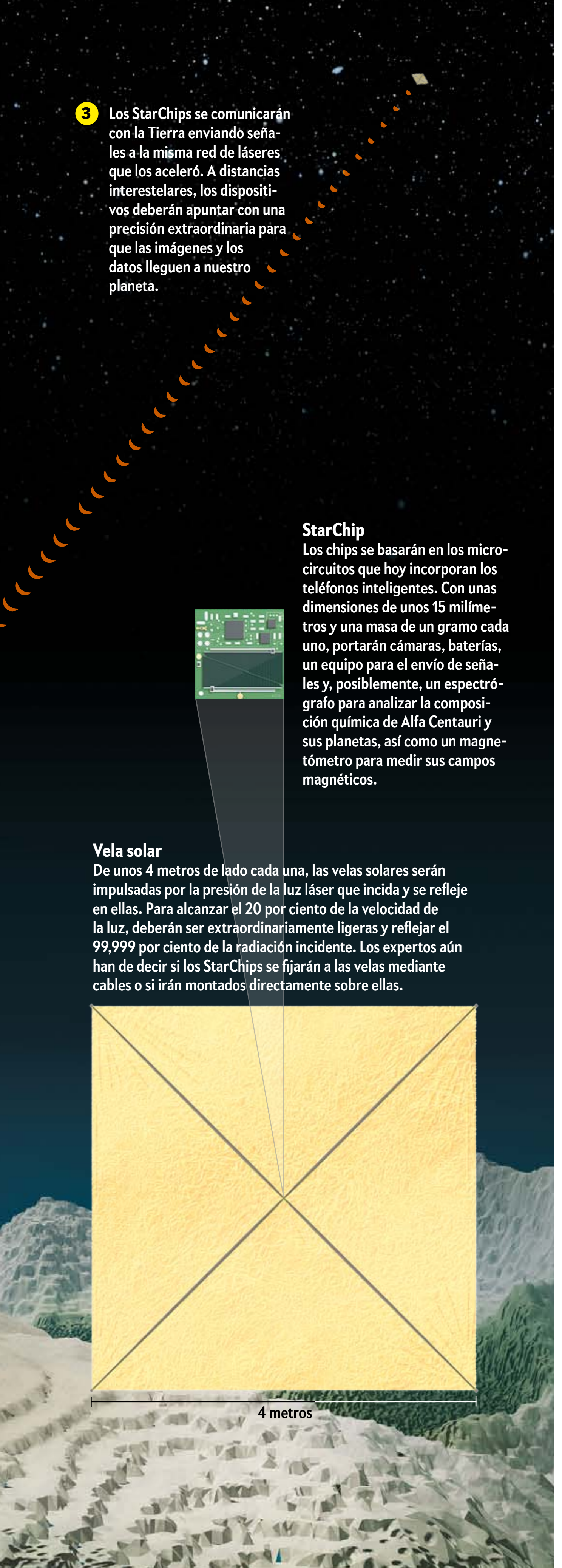
Vela solar con StarChip

Nave nodriza

1 Una «nave nodriza» será puesta en órbita mediante un cohete tradicional. Una vez allí, liberará un StarChip al día durante más de tres años para que parta hacia Alfa Centauri.

2 Desde la Tierra, cien millones de láseres distribuidos en un área de un kilómetro de lado combinarán sus rayos de forma coherente en un único haz. Al incidir sobre las velas solares de los StarChips, las acelerarán hasta el 20 por ciento de la velocidad de la luz en apenas unos minutos.





BRYAN CHRISTIE

to más sencillo, el StarChip, planteaba numerosos problemas. Debía ser diminuto y pesar unos pocos gramos, pero también capaz de almacenar y enviar datos, transportar su propia fuente de alimentación y sobrevivir al largo viaje. Hace unos años, el grupo del ingeniero Mason Peck, de Cornell, diseñó lo que denominaron Sprites: chips similares a los de un teléfono inteligente y dotados de un sensor de luz, paneles solares y un equipo de radio, cada uno de unos cuatro gramos. Los de Starshot seguirían el modelo de los Sprites, pero pesarían incluso menos, alrededor de un gramo, y llevarían cuatro cámaras cada uno. En vez de pesadas lentes para enfocar las imágenes, una opción consistiría en colocar sobre el sensor de luz una diminuta red de difracción, llamada matriz plana de captura por transformada de Fourier, la cual separa la luz incidente en longitudes de onda que posteriormente pueden reconstruirse en un ordenador para cualquier distancia focal. Otro equipamiento sugerido para el chip incluye un espectrógrafo, para analizar la composición química de la atmósfera de un planeta, y un magnetómetro, para medir el campo magnético de una estrella.

Los chips también tendrán que enviar sus imágenes a través de distancias interestelares. Los satélites actuales usan diodos láser de un vatio para mandar información, pero a distancias mucho menores. Peck señala que, hasta ahora, la mayor separación ha sido desde la Luna, más de cien millones de veces más cerca que Alfa Centauri. Para alcanzar la Tierra desde allí, el láser necesitaría una puntería extraordinaria. Además, durante el viaje de cuatro años, la señal se dispersaría tanto que solo llegarían unos cientos de fotones. Una posibilidad consistiría en enviar las imágenes mediante repetidores, mandando los datos de unos StarChips a otros situados detrás a distancias regulares. Zac Manchester, investigador de Harvard y miembro del comité asesor, asegura que enviar la información a la Tierra plantea un problema «verdaderamente complejo».

Los chips también necesitarán baterías para las cámaras y para que los ordenadores de a bordo transmitan datos durante el viaje de 20 años. Dada la distancia a Alfa o Próxima Centauri y los pocos vatios que pueden alcanzarse en un pequeño chip, la señal llegaría a la Tierra débil, aunque «justo con los suficientes fotones para ser captada por el receptor de Starshot», afirma Peck. Hasta la fecha, ninguna fuente de alimentación funciona simultáneamente en condiciones de oscuridad y bajas temperaturas, pesa menos de un gramo y cuenta con suficiente alimentación. «La alimentación constituye el mayor problema del chip», asegura Peck, quien sugiere la posibilidad de adaptar las diminutas baterías nucleares usadas en los implantes médicos. Otra alternativa consistiría en aprovechar la energía ganada por la vela mientras viaja a través del medio interestelar y se calienta por el rozamiento con el gas y el polvo.

Sin embargo, el mismo medio interestelar también podría comprometer la integridad de los chips. Dicho medio se asemeja al humo altamente enrarecido de un cigarrillo, explica Bruce Draine, astrónomo de la Universidad de Princeton y miembro del comité. Nadie conoce con exactitud su densidad ni el tamaño de los granos de polvo que contiene, por lo que resulta difícil estimar su capacidad devastadora. A una velocidad cercana a la de la luz, una colisión de los StarChips contra granos de cualquier tamaño podría producir desde pequeños cráteres hasta su destrucción total. Si los StarChips abarcan un centímetro cuadrado, se producirán muchísimas colisiones a lo largo del camino, advierte Drain. Una posible protección frente a las partículas de menor tamaño podría conseguirse con un revestimiento de cobre y berilio de un par de milímetros de espesor, aunque los granos de polvo aún

podrían causar daños catastróficos. «El chip sobrevivirá o no», dice Peck. Pero, con suerte, de los cientos o miles de ellos que se lancen, algunos resistirán.

En orden de dificultad técnica creciente, el siguiente elemento más delicado es la vela solar. Los StarChips estarían propulsados por la luz que incidiese y se reflejase en sus velas, como cuando una pelota de tenis rebota en una raqueta. Cuanta más luz se refleje, mayor será el impulso y más rápido avanzará la vela. Para alcanzar el 20 por ciento de la velocidad de la luz, la vela solar debería reflejar el 99,999 por ciento de la luz incidente. «Toda la que no se refleje acabará calentando la vela», explica Geoffrey Landis, científico del Centro de Investigación Glenn de la NASA y miembro del comité asesor. Y, dadas las extraordinarias temperaturas que alcanzará el láser, sería desastroso que incluso una pequeña fracción de esa potencia calentase la vela, aclara el investigador. En comparación con las velas solares actuales, que hasta ahora han aprovechado la luz del Sol para propulsar algunas naves experimentales en el sistema solar, las de Starshot tendrían que ser mucho más ligeras, con un espesor de pocos átomos o «como una pompa de jabón», en palabras de Landis. En el ensayo más parecido efectuado hasta ahora, realizado en el año 2000 por Benford, se empleó un haz de microondas para acelerar una vela fabricada con una lámina de carbono hasta 13*g* (13 veces la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre). Sin embargo, la vela de Starshot tendrá que soportar aceleraciones de hasta 60.000*g*. Y, al igual que el StarChip, también tendrá que resistir el polvo interestelar. Hoy por hoy no existe un material que sea al mismo tiempo ligero, fuerte, reflectante, resistente al calor y que no cueste millones de dólares. «Uno de los varios milagros que tendremos que obrar será inventar el material de la vela», reconoce Klupar.



YURI MILNER, el mecenas del proyecto Breakthrough Starshot, sostiene un prototipo de StarChip durante la conferencia de prensa celebrada el 12 de abril de 2016 en Nueva York para presentar la misión. Junto a él se encuentran los físicos Stephen Hawking y Freeman Dyson, asesores del proyecto.

Y aún quedan aspectos por decidir. El chip podría unirse a la vela mediante cables o bien quedar montado sobre ella. Y la vela podría girar, lo que le permitiría permanecer centrada con respecto al láser. Tras la aceleración inicial, cabría la posibilidad de plegar la vela como un paraguas, lo que la haría menos vulnerable durante el viaje. Una vez en Alfa Centauri, se abriría y ajustaría su curvatura para actuar como el espejo de un telescopio o como una antena en el envío de mensajes a la Tierra.

No obstante, todos estos retos serán más sencillos que los relativos al láser. La única forma de alcanzar una fracción considerable de la velocidad de la luz es empleando un láser de 100 gigavatios, una potencia nada usual. El Departamento de Defensa de EE.UU. ha fabricado láseres más potentes, apunta Robert Peterkin, jefe científico de la Junta de Energía Dirigida, perteneciente al Laboratorio de Investigación de las Fuerzas Aéreas de EE. UU., pero solo se activaron durante billonésimas o milmillonésimas de segundo. Sin embargo, el láser de Starshot tendrá que actuar sobre cada vela durante varios minutos. Para alcanzar semejante potencia durante tanto tiempo, una batería de pequeños láseres de fibra óptica combinaría los rayos en un único haz coherente. El Departamento de Defensa también ha construido baterías de láseres en fase, pero con 21 láseres agrupados en una red de no más de 30 centímetros de lado, explica Peterkin. Eso permite alcanzar unas decenas de kilovatios. Starshot tendría que incorporar 100 millones de estos láseres con potencias de kilovatios y disponerlos en una red cuadrada de un kilómetro de lado. «¿Cuán lejos queda eso de la tecnología actual?», se pregunta Peterkin.

«Y las complicaciones van en aumento», añade. La turbulencia habitual de la atmósfera desviaría el haz de cada uno de los 100 millones de pequeños láseres de manera diferente. Al final, todos deberían focalizarse sobre una vela de cuatro metros de lado situada a 60.000 kilómetros de altitud. «Por el momento, poner en fase 100 millones de láseres a través de la turbulencia atmosférica y apuntar a un blanco de pocos metros ubicado a 60.000 kilómetros acapara mi atención», dice secamente Robert Fugate, científico jubilado de la Junta de Energía Dirigida y miembro del comité. La luz podría errar por completo su objetivo o, con mayor probabilidad, alcanzar la vela de forma irregular, por lo que ciertas zonas recibirían un impulso mayor que otras y la nave se tambalearía, giraría o se saldría del haz.

Una vez más, el equipo de Starshot ha dado con una posible solución, si bien se trata de una que presenta sus propios problemas. Una técnica conocida como óptica adaptativa, usada ya en grandes telescopios, permite cancelar la distorsión causada por la atmósfera mediante de un espejo flexible, el cual genera una distorsión igual y opuesta. Sin embargo, será necesario efectuar grandes ajustes para adecuarla al proyecto. En vez de un espejo, habría que configurar minuciosamente cada láser de fibra óptica. La óptica adaptativa usada hoy en los telescopios permite una resolución de 30 milisegundos de arco, pero Starshot tendría que enfocar el haz en 0,3 milisegundos de arco, algo que jamás se ha hecho.

Y, aunque se lograsen desarrollar todas estas complicadas y disparatadas técnicas, después tendrían que funcionar en conjunto. Para los líderes de Starshot, eso equivale a armar un rompecabezas con piezas que cambian de forma o que aún no existen. El sistema aún carece de un diseño único, señala Kevin Parkin, ingeniero de sistemas de Parkin Research e integrante del comité. El plan para los cinco primeros años, apunta Klupar, es «recolectar la tecnología». Es decir, asesorados por los expertos del comité, los miembros del equipo realizarán experimentos a pequeña escala y desarrollarán modelos matemáticos. En el invierno de 2015-2016 comenzaron averiguando qué técnicas existían ya y solicitaron propuestas sobre aquellas aún por desarrollar. En 2017 tienen la intención de adjudicar pequeños contratos con importes desde varios cientos de miles de dólares hasta 1,5 millones. Los prototipos vendrán a continuación y, suponiendo que tengan éxito, la construcción del láser y de la vela podría comenzar a principios de los años treinta de este siglo, con el lanzamiento para mediados de los cuarenta. Para entonces, Starshot probablemente habrá costado miles de millones de dólares y, con suerte, habrá logrado la colaboración de Gobiernos, laboratorios y agencias espaciales en EE.UU., Europa y Asia. «Defenderé el proyecto, y espero que se apunte más gente», afirma Milner. «Ha de ser global», añade, mencionando las

JEMAL COUNTESS, GETTY IMAGES

lógicas preocupaciones sobre seguridad nacional que plantearía una descomunal instalación láser. «Si algo como esto comienza en secreto, habrá muchos más interrogantes. Es importante anunciar abiertamente nuestras intenciones.»

CAMINO DE LAS ESTRELLAS

Con todos esos obstáculos, ¿cuáles son las probabilidades de éxito? Los expertos en tecnología ajenos a Starshot estiman que son pequeñas. Varios de ellos me dijeron abiertamente: «No van a ir a Alfa Centauri». David Charbonneau, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, aduce que el proyecto resultará tan costoso que habrá que convencer a EE.UU. para que invierta el 5 por ciento del presupuesto nacional, la misma fracción que requirió el programa Apolo.

Los implicados en Starshot piensan que las probabilidades son mayores, pero se muestran pragmáticos. «Claro que podemos usar láseres para enviar naves a Alfa Centauri», asegura Greg Matloff, de la Escuela de Tecnología de Nueva York y miembro del comité. «Lo que no sé es si podremos llegar allí en los próximos 20 años.» Para Manchester, las probabilidades de lograrlo de aquí a 50 años son bastante altas, y, dentro de un siglo, «del cien por cien». Worden cree que el planteamiento está cuidadosamente medido, y que quizá dentro de cinco años descubran que no pueden ejecutarlo. Y Milner considera que su papel en Starshot, además de la financiación, consiste en mantenerlo en términos prácticos y bien fundamentados. «Si requiriese más de una generación, no deberíamos trabajar en el proyecto», sentencia.

Hasta agosto del año pasado pensé que Dyson tenía razón: la tecnología era interesante, pero ir a Alfa Centauri resultaba absurdo. Se trata de un sistema binario formado por estrellas similares al Sol. Ninguna es extraordinaria. Los astrónomos ya saben bastante sobre ellas, apunta Charbonneau, y aunque fuese útil comparar sus llamaradas y campos magnéticos con los del Sol, «la inversión no merece la pena para lo que aprenderíamos sobre física estelar viajando hasta allí».

Ahora que los astrónomos saben que la vecina de Alfa Centauri tiene un planeta, la motivación científica es otra. Próxima Centauri se encuentra un poco más cerca de la Tierra y es una enana roja, el tipo de estrella más habitual. El planeta, Próxima b, se halla en la zona habitable del astro. Cuando se anunció el descubrimiento, el equipo de Starshot lo celebró con una cena. ¿Considerarían un cambio de objetivo? «Por supuesto», responde Milner. «Tenemos tiempo de sobra para decidir.» La batería de láseres debería ser lo bastante flexible para adaptarse a la diferencia; «unos dos grados», especifica Fugate.

En última instancia, el objetivo de Breakthrough Initiatives consiste en encontrar todos los planetas del vecindario solar, señala Klupar, y Próxima b podría ser solo el primero. «Me siento como un entomólogo que levanta una roca, encuentra un insecto y luego piensa que habrá uno debajo de todas las demás rocas», ejemplifica. «No es cierto, pero de algún modo resulta estimulante.»

Desde luego, ni siquiera la presencia de Próxima b basta para convertir a Starshot en un proyecto científico rompedor. Los chips tal vez tomen imágenes y quizá midan el campo magnético del planeta o analicen su atmósfera, pero habrán de hacerlo en pocos minutos. Y, dado el coste final del proyecto y el tiempo que transcurrirá hasta el lanzamiento, «podríamos construir un telescopio espacial óptico de 12 o 15 metros, observar el planeta durante meses y obtener mucha más información que en un sobrevuelo fugaz», opina David Spergel, astrofísico de Princeton.

Con todo, los multimillonarios son libres de invertir en lo que deseen, y las almas gemelas son libres de unirse a ese anhelo. Además, muchos de quienes cuestionan el valor científico de Starshot lo apoyan de todos modos, ya que, al desarrollar la tecnología necesaria, puede darse casi por seguro que los ingenieros lograrán algo interesante. «No resolverán todos los problemas, pero solucionarán uno o dos», afirma Spergel. Una respuesta ingeniosa a un solo problema complejo ya constituiría un gran éxito, sostiene. Y aunque Starshot no triunfase, las técnicas que se desarrollasen podrían usarse en misiones futuras a destinos importantes, tanto dentro como fuera del sistema solar.

La debilidad que Milner siente por el proyecto radica en su esperanza de que podrá unir a todas las personas del mundo bajo la idea de que somos un planeta y una especie. «En los últimos seis años he pasado la mitad de mi tiempo viajando, en gran parte por Europa y Asia», relata. «Me he dado cuenta de que un consenso global es difícil, pero no imposible.» Ese objetivo encaja con los otros proyectos de Breakthrough Initiatives, que en esencia persiguen encontrar extraterrestres con quienes comunicarse, y con las notables inversiones de Milner en Internet y redes sociales, que han transformado las nociones de conversación y comunidad. Pero, en el fondo, incluso él mismo reconoce que el deseo de ir a otra estrella es inexplicable. «Si continúa preguntándome el porqué, acabaré reconociendo que no lo sé. Solo pienso que es importante.»

Casi todo el mundo a quien he interpelado me ha respondido lo mismo: no pueden explicarlo a alguien que no lo comprende, simplemente quieren ir allí. James Gunn, profesor emérito del departamento de astrofísica de Princeton, piensa que las probabilidades de éxito de Starshot son escasas y rechaza las motivaciones científicas. Pero, a pesar de ello, confiesa: «Soy racional sobre la mayoría de las cosas, pero no especialmente sobre los límites de la humanidad. He soñado con ir a las estrellas desde que era niño». Buena parte de los miembros del comité asesor me indicaron lo mismo. «Es genial», zanja Landis, repitiendo las palabras exactas de otros miembros.

Quizá Dyson sea quien mejor expresa las contradicciones inherentes a esos sueños. Sostiene que una vela solar con un microchip e impulsada por láser tiene sentido, y que quienes están detrás del proyecto son inteligentes y «bastante sensatos». Pero piensa que deberían abandonar el intento de ir a Alfa o Próxima Centauri y centrarse en la exploración del sistema solar, donde los StarChips podrían propulsarse con láseres menos potentes y más viables y viajar a velocidades menores. «La exploración es algo inherente al ser humano», apunta. «Es algo en lo que destacamos.» Piensa que las máquinas deberían explorar el universo, y que no hay una justificación científica para enviar seres humanos. Entonces, con su característica imprevisibilidad, añade: «Por otro lado, me encantaría ir allí». IyC

PARA SABER MÁS

A roadmap to interstellar flight. Philip Lubin en *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 69, págs. 40-72, 2016.
Página web del proyecto dBreakthrough Starshot: **breakthroughinitiatives.org/Initiative/3**

EN NUESTRO ARCHIVO

Vehículos espaciales del siglo XXI. Freeman J. Dyson en *IyC*, noviembre de 1995.
Empuje lumínico. Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik en *IyC*, marzo de 2010.
La humanidad en el espacio. Cameron M. Smith en *IyC*, marzo de 2013.



INMUNOLOGÍA

UNA NUEVA ARMA CONTRA EL CÁNCER

Ya es posible tratar ciertos tumores avanzados con células inmunitarias sintéticas que son más potentes y persistentes que ninguna otra célula del organismo

Avery D. Posey Jr., Carl H. June y Bruce L. Levine



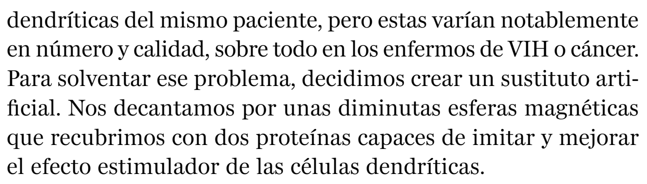
HACE DÉCADAS QUE LOS INMUNÓLOGOS QUE ESTUDIAN LOS TUMORES SABEN QUE EL sistema inmunitario puede ser un gran aliado contra el cáncer. Pese a ello, los primeros intentos por aprovechar su potencial resultaron decepcionantes. No se supo estimular lo suficiente un componente clave del sistema inmunitario, esa especie de sargento mayor que es el linfocito T. Sin reforzar la capacidad de este leucocito para descubrir y atacar a las células cancerosas, a todos los efectos se estaba pidiendo al sistema inmunitario que marchara a la guerra con el equivalente biológico de aviones de papel y pistolas de feria.

Los primeros indicios de la necesidad de fortalecer a los linfocitos T en su lucha contra el cáncer surgieron en los años ochenta del siglo xx. Entonces se intentó reforzar la respuesta inmunitaria extrayendo los linfocitos T del paciente para multiplicarlos en el laboratorio y reinyectárselos después. Esta estrategia sirvió de algo a ciertas personas, pero no solía funcionar durante mucho tiempo: proclives al agotamiento, las células dejaban de actuar poco después de su administración.

Avery D. Posey Jr. es profesor de patología y medicina de laboratorio en la Facultad de Medicina Perelman de la Universidad de Pensilvania.

Carl H. June es catedrático de patología y medicina de laboratorio en la Facultad de Medicina Perelman de la Universidad de Pensilvania.

Bruce L. Levine ostenta la cátedra de terapia génica oncológica en la misma facultad.



A raíz de ello, varios grupos de investigación empezaron a enfocar el problema con distintos prismas. Hoy, una nueva estrategia está resultando tremendamente prometedora. Ya a mediados de los noventa, mientras intentaban descubrir nuevos tratamientos contra el VIH, dos de los autores (June y Levine) crearon una técnica mejorada que, en comparación con los métodos precedentes, reforzaba extraordinariamente los linfocitos T extraídos de los pacientes, tanto en número como en potencia y persistencia de sus efectos. Años después, hace una década, vio la luz un método que alteraba genéticamente los linfocitos T para que pudieran reconocer y atacar a ciertos tipos de cáncer originados en los glóbulos blancos de la sangre, como la leucemia y el linfoma.

Desde hace pocos años, esas células inmunitarias sintéticas, los linfocitos T provistos de receptores quiméricos de antígenos (T-CAR, por sus siglas en inglés), han sido puestas a prueba en docenas de estudios en que han participado casi mil enfermos con casos avanzados de leucemia y linfoma. Las cifras varían según el tipo de enfermedad, pero hoy en día más de la mitad está gozando de más tiempo de vida del pronosticado y cientos parecen haber desterrado el cáncer.

Entre los investigadores se está generando un consenso en torno a la idea de que el tratamiento con los linfocitos T-CAR, ya sea solo o combinado, acabará proporcionando una cura duradera para ciertos tipos de cáncer sanguíneo. Habrá que superar obstáculos, como confirmar que este tipo de terapia pueda ser eficaz contra otros tumores y mejorar el control de los efectos secundarios, algunos potencialmente mortales. Pero los éxitos cosechados hasta la fecha, tras resolver complicados retos a lo largo de casi 20 años, resultan esperanzadores.

REFORZAR LOS LINFOCITOS T

Cuando iniciamos la senda que nos acabó conduciendo hasta los linfocitos T-CAR, nuestra primera tarea (hallar el modo de reforzar la actividad citocida de los linfocitos extraídos de los pacientes) era cualquier cosa menos sencilla. Para ser activado, el linfocito T debe recibir señales procedentes de otros integrantes del sistema inmunitario: las células dendríticas. Solo después de recibir esas órdenes puede el linfocito desplegar todo su potencial. Se divide y genera copias de sí mismo (todas dirigidas contra la misma diana) y libera sustancias denominadas citocinas que estimulan la respuesta defensiva del organismo. Al cabo de unos días, los linfocitos T se desmovilizan, lo que permite que el organismo (y el sistema inmunitario) recupere la normalidad.

A mediados de los noventa, mientras estudiaban el VIH, June y Levine decidieron mejorar ese proceso natural estimulando los linfocitos T en el laboratorio. El objetivo consistía en extraer del paciente algunas de esas células, activarlas, hacer que se multiplicaran muchas más veces de lo que sería posible en su cuerpo antes de volvérselas a inyectar esperando que estimulasen la actividad inmunitaria contra el VIH y las demás infecciones que afligen a las personas con sida, la última fase de la infección vírica.

Pero primero había que dar con la forma idónea para activar los linfocitos T. En teoría, podíamos exponerlos a las células dendríticas del mismo paciente, pero estas varían notablemente en número y calidad, sobre todo en los enfermos de VIH o cáncer. Para solventar ese problema, decidimos crear un sustituto artificial. Nos decantamos por unas diminutas esferas magnéticas que recubrimos con dos proteínas capaces de imitar y mejorar el efecto estimulador de las células dendríticas.

A continuación, extrajimos los linfocitos T de la sangre de los pacientes y los estimulamos con las esferas multiuso. Hacia el final del proceso, de entre 5 y 10 días de duración, cada linfocito T tomado del paciente habrá engendrado otros cien. Este método de las microesferas es ahora una de las principales herramientas de que se dispone para crear los linfocitos T activados que se destinan a numerosos experimentos y ensayos clínicos.

REDISEÑAR LOS LINFOCITOS T

A la hora de organizar la respuesta defensiva contra el cáncer, el cuerpo encara dos graves problemas. El primero estriba en que las células malignas surgen de las células propias. Como el sistema inmunitario ha evolucionado para no atacar a nuestros tejidos, a menudo tiene problemas para distinguir las células tumorales de las que no lo son. El segundo es que muchas de esas células esgrimen artimañas para eludir la respuesta inmunitaria: han aprendido a pasar desapercibidas y a entorpecer su actuación.

Como parte del mecanismo que protege los tejidos sanos del «fuego amigo», el linfocito T inspecciona la célula sospechosa para comprobar si en su superficie presenta dos moléculas necesarias para que sobrevenga el ataque. La primera es un voluminoso complejo proteico denominado MHC, que contiene un fragmento proteico, o antígeno, la diana que las células dendríticas «presentan» a los linfocitos T. La segunda, el ligando coestimulador, constituye la señal necesaria para desatar el ataque. Si el complejo antígeno-MHC y el ligando coestimulador no concurren, el linfocito T sigue su camino sin más. Por tanto, la célula maligna dispone al menos de dos ardides para que la dejen en paz: cesar de producir las moléculas MHC en su superficie o presentar en ella una variante aberrante del ligando coestimulador que desactive los linfocitos T.

Pero ¿qué ocurriría si fuera posible modificar genéticamente los linfocitos T para que fuese el investigador, y no las células

EN SÍNTESIS

Una célula inmunitaria sintética, el linfocito T provisto de receptores quiméricos de antígenos, o linfocito T-CAR, ha demostrado una eficacia extraordinaria contra la leucemia y el linfoma.

Los linfocitos T-CAR estimulan y refuerzan la capacidad del organismo para combatir las células malignas. Pero pueden provocar efectos secundarios y, en algunos casos, la muerte.

En este momento se están diseñando nuevos linfocitos T-CAR con la esperanza de tratar otros tipos de cáncer y causar menos efectos secundarios perjudiciales.

PÁGINAS ANTERIORES: JAMES YANG

Células inmunitarias sintéticas

En los últimos años, los investigadores han concebido una serie de tratamientos experimentales destinados a potenciar la capacidad del sistema inmunitario para identificar y destruir las células tumorales. Entre dichos tratamientos, la administración de las células inmunitarias sintéticas denominadas linfocitos T-CAR ha resultado ser particularmente eficaz en casos avanzados de leucemia y linfoma. En cada linfocito T-CAR diseñado a medida se han integrado dos poderosos resortes, esquematizados aquí, que refuerzan la respuesta inmunitaria.

La respuesta inmunitaria normal es compleja

El sistema inmunitario sano es capaz de reconocer y destruir las células cancerosas, pero el proceso es complejo y tiene tendencia a malograrse. Las células dendríticas absorben y procesan algunas de las proteínas radicadas en la superficie o en el interior de la célula maligna. Más adelante, cuando una de esas células inmunitarias se vuelva a encontrar con ciertos glóbulos blancos denominados linfocitos T, les «enseñará» fragmentos de tales proteínas, conocidos como antígenos. Esto propicia que el linfocito T haga dos cosas: (1) Que busque e identifique cualquier célula que contenga tanto el antígeno que le ha sido presentado por la célula dendrítica como otra proteína denominada MHC; y (2), que ataque a la célula portadora del antígeno en el caso de que también presente una tercera proteína, el ligando coestimulador.

Célula tumoral

Antígeno específico del cáncer (*rojo*)

Célula dendrítica

La célula dendrítica activa los linfocitos T

Linfocito T activado

Citocinas

Receptor del ligando

Ligando coestimulador

Receptor del antígeno

Antígeno mostrado

Proteína MHC

Célula tumoral destruida

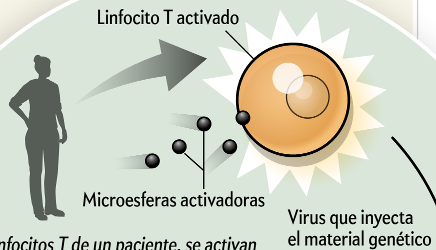
Antígeno oculto

Una vez que el linfocito T identifica positivamente el antígeno, el MHC y el ligando coestimulador, inicia el ataque contra la célula tumoral y libera citocinas con las que atrae a otras células inmunitarias a la refriega. Pero si la célula tumoral (a la derecha) carece de MHC o del ligando coestimulador, se vuelve invisible para el sistema inmunitario y se libra de la destrucción.

La terapia con linfocitos T-CAR agiliza el proceso

Los linfocitos T-CAR (dotados de un receptor quimérico de antígenos) son mucho más potentes que ninguna otra cosa que pueda producir el organismo de forma natural. Mientras que los linfocitos T ordinarios cesan su ataque en pocas semanas, los genomodificados T-CAR permanecen activos por espacio de meses, incluso años, contra las dianas seleccionadas por el investigador, como por ejemplo la proteína CD19.

Resorte 1:
A diferencia de la mayoría de los linfocitos T, los T-CAR poseen un detector de antígenos (CAR) que les permite reconocer antígenos diana que no están unidos a una molécula del MHC sino que sencillamente se hallan sobre la superficie de la célula. Además, son los investigadores y no las células dendríticas los que deciden contra qué antígenos deben actuar. El material genético necesario para fabricar el CAR se introduce en los linfocitos T por medio de una cápsula de virus previamente vaciada.



Virus que inyecta el material genético

Se extraen linfocitos T de un paciente, se activan mediante las microesferas que asumen el papel de las células dendríticas y, posteriormente, se reprograman (con el material genético suministrado por el virus) para que se dirijan hacia cualquier célula que presente en su superficie la proteína escogida.

CAR dirigido contra la proteína CD19

Linfocito T con CAR en su superficie

Resorte 2:
Los linfocitos T-CAR no requieren que la célula diana posea un ligando coestimulador para actuar. Así pues, siempre están en guardia y solo necesitan la presencia del antígeno seleccionado —en este caso, la CD19— para atacar.

Linfocito T-CAR

Citocinas

Proteína de la superficie CD19

Célula tumoral destruida

Los linfocitos T-CAR reconocen la CD19 y de inmediato comienzan a atacar la célula tumoral, sin precisar el concurso del MHC ni de un ligando coestimulador.

JEN CHRISTIANSEN

dendríticas, quien escogiese el antígeno diana, por ejemplo uno que abunde en las células tumorales pero que no sea presentado por el MHC? ¿Y qué sucedería si tales linfocitos no tuviesen que pasar por las dos etapas normales para atacar a las células tumorales? Solo con el advenimiento de las técnicas basadas en los linfocitos T-CAR se pudo intentar esto con perspectivas de éxito.

La solución, en principio, consistió en dotarlos de los genes que diesen lugar a una molécula sintética (CAR) que pudiese hacer dos cosas a la vez: detectar el antígeno seleccionado y activar el linfocito T, aun sin las señales habituales para proceder. Tal objetivo era posible si se combinaban elementos de unas proteínas especializadas denominadas anticuerpos (que normalmente actúan contra bacterias y virus) con otras proteínas caracterizadas por estimular a los linfocitos T. Más en concreto, diseñamos la parte exterior del CAR que actúa como un anticuerpo, y que sobresale un poco de la superficie de la célula, para que se uniese al antígeno tumoral que habíamos escogido. Y construimos la parte restante, que atraviesa la membrana del linfocito, con objeto de que pudiese emitir las señales oportunas y activar a su portador tan pronto como detectase el antígeno en cuestión.

Por supuesto, la idea de recurrir a los antígenos específicos del cáncer para combatir las neoplasias malignas no es nueva. En los años noventa, los médicos comenzaron a tratar a los pacientes con anticuerpos monoclonales, que buscan proteínas específicas presentes mayoritariamente en la superficie de las células de diversos tumores. Pero los anticuerpos solo perduran unas semanas en el organismo. Los linfocitos T genomodificados, en cambio, vivirían lo mismo que los no tratados: varios años.

El quid de la cuestión radicaba en lograr que los linfocitos T produjesen la molécula mixta anticuerpo-activador que habíamos escogido. Decidimos aprovechar la consabida predilección del VIH por estos linfocitos: eliminamos los genes que convierten a este virus en mortal y los sustituimos por otros provistos de la información necesaria para fabricar la quimera de anticuerpo y activador. A continuación, permitimos que las partículas víricas del VIH, ahora inocuas, infectasen a los linfocitos T extraídos de los pacientes. Los virus alterados actuaron como caballos de Troya e introdujeron los genes en el interior de las células; a partir de ahí, los linfocitos hicieron el resto, fabricando los CAR y llevándolos hasta su superficie. Por medio de esta y de otras técnicas, diversos grupos de investigación, entre ellos el nuestro, han logrado remodelar los linfocitos T para que ataquen a las células tumorales sin otro requisito que el de reconocer a una molécula de su superficie, es decir, sin la intermediación del MHC ni de un ligando coestimulador. Además, es posible diseñar a medida el nuevo linfocito para que reconozca con exactitud cualquier antígeno escogido —quizá también una combinación de varios.

A mediados de los noventa y principios de 2000, en colaboración con otros investigadores, descubrimos la forma de convertir los linfocitos T de pacientes con VIH en T-CAR y los utilizamos en ensayos clínicos con humanos. Seguimos refinando la técnica y esperamos disponer en pocos años de terapias más avanzadas contra el virus.

Entretanto, varios grupos estaban empezando a usar los linfocitos T-CAR en pacientes con cáncer. Nos propusimos aunar las técnicas aprovechando todo lo aprendido acerca de la activación de los linfocitos T con microesferas, del uso de los CAR para rediseñarlos y redirigirlos y de la transformación del VIH en un caballo de Troya para introducir los CAR en ellos. Pronto descubrimos lo poderosos que podían ser esos linfocitos.

EL NUEVO DISEÑO, A PRUEBA

Contábamos ya con la potencia de fuego necesaria y estábamos bastante seguros de que la diana escogida era buena. La señal idónea para dirigir nuestros linfocitos T-CAR contra su objetivo sería, por supuesto, un antígeno solo presente en la superficie de las células tumorales, por desgracia algo excepcional. Como toda célula tumoral surge de lo que fue una célula normal, ambas presentan prácticamente los mismos antígenos. Crear un linfocito T-CAR contra esos antígenos comunes destruiría inevitablemente gran cantidad de tejido sano, además del tumor.

Existen, empero, destacadas excepciones a esa norma. Ciertos tipos de leucemia y linfoma surgen a partir de los glóbulos blancos denominados linfocitos B. Las personas pueden vivir sin ellos, la fuente que surte de anticuerpos al organismo, a condición de que se les suministre de vez en cuando un cóctel de anticuerpos prefabricados. El linfocito B, al igual que cualquier célula maligna en la que se pueda convertir, porta en su superficie una proteína llamada CD19. Nuestro grupo, como otros en el mismo campo, creía que la CD19 podía ser una diana interesante para la terapia con los linfocitos T-CAR, puesto que no se halla en ningún otro tejido sano.

Probamos la idea en ratones. Por entonces, a inicios de esta década, emprendimos un ensayo clínico con T-CAR dirigidos contra la CD19. Los primeros tres pacientes eran adultos con casos avanzados de leucemia linfocítica crónica que no respondía a ningún tratamiento.

El primero era William Ludwig, un funcionario jubilado diagnosticado desde hacía una década que era portador de más de 2,3 kilos de células leucémicas en su organismo. En agosto de 2010 se le suministraron mil millones de sus linfocitos convenientemente genomodificados en T-CAR. Al cabo de diez días sufrió un grave cuadro de fiebre, hipotensión y disnea que exigió su ingreso en la unidad de cuidados intensivos. Después supimos que los síntomas estaban motivados por la hiperactividad del sistema inmunitario, que se había desbocado a consecuencia del enorme número de citocinas puesto en circulación, una reacción conocida como síndrome de liberación de citocinas que puede abocar a la muerte.

Por suerte, Ludwig salió adelante y un mes después no se halló en él ni rastro de los linfocitos B leucémicos. Ante tan extraordinario e inesperado hallazgo se le practicó una segunda biopsia, con idéntico resultado que la primera. A continuación tratamos a los otros dos pacientes, que también respondieron de forma extraordinaria. Casi siete años después, Ludwig y otro de los pacientes siguen vivos y sin rastro de la leucemia. Análisis ulteriores demostraron que los linfocitos T-CAR habían proliferado en el torrente sanguíneo y en la médula ósea, donde nacen las células de la sangre; cada T-CAR (o sus hijos) inyectado a

estos tres pacientes pudo acabar con entre 1000 y 93.000 células tumorales. Cuando meses más tarde se les extrajeron algunos de muestras de sangre, aún eran capaces de aniquilar las células leucémicas portadoras de la molécula CD19. Estos tenaces centinelas se habían convertido en un «medicamento vivo» que seguía patrullando el cuerpo en busca de cualquier rebrote de la enfermedad.

AMPLIAR EL REPERTORIO

A pesar de lo significativos que fueron nuestros resultados iniciales, el dinero se acabó y no pudimos probar nuestro tratamiento experimental en más pacientes. Los comités evaluadores de las agencias federales de investigación de EE.UU. consideraron que era demasiado arriesgado y que, por tanto, no merecía más fondos. Pese a ello, enviamos dos artículos que describían los casos de esos tres primeros pacientes que fueron aceptados sin dilación y publicados en agosto de 2011 en *New England Journal of Medicine* y en *Science Translational Medicine*. La cobertura mediática fue sonada, como numerosas las consultas a la Universidad de Pensilvania —donde trabajamos— por parte de empresas biotecnológicas nacientes y de grandes laboratorios farmacéuticos, interesados en obtener el permiso para usar la técnica.

Al final, una de nuestras solicitudes de financiación prosperó y pudimos iniciar otro ensayo clínico en 2012, esta vez con niños. Posteriormente decidimos firmar una alianza entre la Universidad de Pensilvania y Novartis para financiar el desarrollo y la futura presentación de nuestros resultados a la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA), con vistas a su comercialización. La noticia de esta colaboración desató un frenesí de licencias e inversiones, en el que multitud de centros médicos de todo el mundo fundaron empresas biotecnológicas dedicadas a la producción de nuevas variantes de T-CAR. Nuestros últimos resultados con niños mostraron un índice de supervivencia a los 12 meses del 62 por ciento, cifra que es preciso contrastar con el derivado de los tratamientos ordinarios, que no alcanza el 10 por ciento.

En los últimos años, muchos grupos (el Centro del Cáncer Memorial Sloan Kettering, el Hospital Infantil de Seattle, el Centro de Investigación del Cáncer Fred Hutchinson junto a la empresa Juno Terapeuthics, el Instituto Nacional del Cáncer en colaboración con la empresa Kite Pharma, etc.) han comunicado resultados inauditos en casos avanzados de leucemia y linfoma. En nuestro centro hemos tratado a 300 pacientes con linfocitos T-CAR dirigidos contra neoplasias malignas de los linfocitos B. Las tasas de respuesta varían según la enfermedad, pero cerca de la mitad de nuestros afectados por la leucemia linfocítica crónica avanzada han mostrado una notable mejoría (basada, entre otros factores, en la disminución de las células leucémicas), mientras que cerca del 90 por ciento de los niños con leucemia linfoblástica aguda han evidenciado una respuesta completa al cabo de un mes de tratamiento, sin que se hallara rastro de las células tumorales.

Nadie sabe realmente por qué los linfocitos T-CAR no funcionan en todos los pacientes con neoplasias asociadas a la CD19. Algunas recaídas parecen obedecer a la incapacidad de los linfocitos para multiplicarse en el paciente o a la aparición de nuevas células leucémicas carentes de la CD19, inmunes al tratamiento. Aun así, la magnitud de la respuesta desatada contra esas neoplasias no tiene precedentes. Se espera que este año dos empresas soliciten la aprobación de la FDA para utilizar los linfocitos T-CAR contra el cáncer: Novartis, contra la leucemia linfoide aguda infantil y, más adelante, para el linfoma; y Kite Pharma contra un tipo de linfoma.

Quedan muchos retos pendientes. Como parte de la comunidad investigadora, seguimos ideando formas de atajar y en lo posible evitar los efectos secundarios más graves. Si bien la mortalidad resulta rara, algunas personas aquejadas de leucemia linfoblástica aguda han fallecido por problemas ligados con el tratamiento, fatalidad que podría deberse, en parte, a su salud precaria, pero también a diferencias en el diseño de los linfocitos T-CAR creados por distintas instituciones. Nos hallamos en las primeras etapas de desarrollo. Es prioritario ampliar el acceso de los enfermos con cáncer de linfocitos B y otros tumores. Y en los años venideros tendrán lugar ensayos clínicos que someterán a prueba recientes avances científicos y técnicos. Si se pretende tratar otros tipos de cáncer, será necesario identificar y actuar contra ciertas combinaciones de antígenos que puedan ser más frecuentes en las células tumorales que en los tejidos sanos. Por ejemplo, en este momento uno de nosotros (Posey) intenta desarrollar un tratamiento inmunitario contra el cáncer de mama y el de páncreas. Estos y otros tumores sólidos son aún mejores que la leucemia y el linfoma a la hora de eludir el sistema inmunitario, pues estos últimos son más accesibles porque circulan por la sangre. Para detectar esas células, Posey está diseñando un linfocito T-CAR que busque dos dianas: la primera es cierta molécula de glúcido exclusiva de la superficie de las células cancerosas, con la que pueden reproducirse con más celeridad que las normales; la segunda es una proteína presente en ambos tipos de células. En teoría, esa combinación de dianas (glúcido y proteína) solo sería frecuente en las primeras, lo que limitaría los daños causados por los linfocitos T-CAR en los tejidos normales.

Por supuesto, los avances no suelen caer del cielo. Las decepciones y los contratiempos son inevitables. Pero estamos convencidos de que los éxitos que hemos presenciado en los casos avanzados de leucemia y linfoma justifican a todas luces proseguir con el desarrollo de nuevos linfocitos T-CAR. IyC

ADVERTENCIA: Como muchos otros investigadores del cáncer, los autores mantienen lazos comerciales con empresas. Avery D. Posey Jr. ha cedido la propiedad intelectual a Novartis y a Tmunity Therapeutics, que desarrollan terapias contra el cáncer. Carl H. June y Bruce L. Levine reciben de Novartis regalías y financiación para sus laboratorios, en virtud de un acuerdo con la Universidad de Pensilvania. Novartis y dicho centro han solicitado patentes de medicamentos basadas en parte en el trabajo resumido en el artículo. June y Levine son fundadores y participan a partes iguales de Tmunity Therapeutics, al tiempo que perciben honorarios como asesores de otras compañías implicadas en la terapia celular y la investigación oncológica. Estas relaciones se ajustan a la normativa de gestión y supervisión de la Universidad de Pensilvania.

PARA SABER MÁS

Fire with fire. Vídeo sobre terapias con linfocitos T-CAR. Dirigido por Ross Kauffman. Red Light Films, 2013. **www.youtube.com/watch?v=h6SzI2ZfPd4**
Adoptive immunotherapy for cancer or viruses. Marcela V. Maus y col. en *Annual Review of Immunology*, vol. 32, págs. 189-225, 2014.
Chimeric antigen receptor T cells for sustained remissions in leukemia. S. L. Maude y col. en *New England Journal of Medicine*, vol. 371, n.º 16, págs. 1507-1517, 16 de octubre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Vacunas contra el cáncer. Eric Von Hofe en *IyC*, diciembre de 2011.
Desactivar el cáncer. Jedd D. Wolchok en *IyC*, julio de 2014.
Las defensas contra el cáncer. Karen Weintraub en *IyC*, junio de 2016.



ECOLOGÍA

El redescubrimiento

Nuevas técnicas de exploración submarina están arrojando luz sobre un mar que alberga fondos sorprendentemente bien conservados, una elevada biodiversidad y especies que la ciencia todavía no había descrito

Josep-Maria Gili, Susana Requena y Andrea Gori

del Mediterráneo



ESTA GORGONIA ROJA (*Paramuricea clavata*) pertenece a una comunidad formada por gorgonias y esponjas hallada a 120 metros de profundidad en el talud continental del Canal de Menorca. Como otras especies formadoras de hábitat, este «arbusto submarino» contribuye con su estructura tridimensional al paisaje de los ecosistemas marinos.

Josep-Maria Gili, profesor de investigación del CSIC, trabaja en el Instituto de Ciencias del Mar (ICM) de Barcelona. Lleva más de cuarenta años desarrollando proyectos de investigación sobre ecología marina en el Mediterráneo y en los océanos Atlántico, Pacífico y Antártico.

Andrea Gori es investigador Beatriu de Pinós en el departamento de ecología de la Universidad de Barcelona. Ha llevado a cabo estudios en ecología y ecofisiología de corales en el Mediterráneo y el Atlántico norte.

Susana Requena es investigadora del ICM y experta en sistemas de información geográfica. Durante los últimos quince años ha participado y coordinado numerosos proyectos nacionales e internacionales para la designación y gestión de áreas marinas protegidas.

El Mediterráneo, cuna de civilizaciones, siempre ha despertado el interés y la curiosidad de los pueblos que se han sucedido en sus costas. Entre 1200 y 800 a.C., los fenicios exploraron sus aguas para establecer una nutrida red de comercio e intercambio entre las ciudades y colonias fundadas en sus orillas, dejando numerosos registros acerca de los seres vivos que lo habitaban. Más tarde, Aristóteles (384-322 a.C.) realizó una serie de estudios que han llevado a considerarlo padre de la biología marina; entre su legado destacan abundantes descripciones verdaderamente científicas y observaciones sobre organismos marinos, en particular sobre los cetáceos.

Desde entonces, con mayor o menor empeño según la época, el Mediterráneo ha sido uno de los mares que más se han investigado. Aun así, sigue siendo en buena parte desconocido. Ello se debe a que su estudio constituye una tarea de suma complejidad, pues requiere un gran despliegue de medios humanos, técnicos y económicos. Con todo, poco a poco se van superando dichos obstáculos. Las técnicas de exploración submarina son cada vez más refinadas, y los programas de conservación, más ambiciosos. Como resultado, nuestra imagen del *mare nostrum* es cada vez más extensa y nítida. Y, conforme esta se va ampliando hacia zonas más profundas, descubrimos un mar con fondos sorprendentemente bien conservados, puntos calientes de biodiversidad y numerosas especies abundantes que todavía nadie había descrito.

AVANCES EN LA EXPLORACIÓN SUBMARINA

Los avances técnicos que han posibilitado el estudio científico de las profundidades marinas son relativamente recientes. Hacia los años sesenta del siglo pasado, equipos como el *soucoupe plongeante* («platillo nadador») del comandante Jacques-Yves Cousteau y la escafandra autónoma se pusieron al alcance de los investigadores y marcaron una nueva era en la historia de la exploración submarina. Sin embargo, la escafandra entrañaba ciertos inconvenientes: la capacidad de los tanques de aire comprimido era limitada y respirar aire a presión podía causar graves complicaciones fisiológicas.

Debido a las dificultades para acceder a los fondos marinos, la visión que teníamos entonces de las profundidades del Mediterráneo era muy parcial. Se basaba en información puntual obtenida de forma indirecta, procedente de dragas o arrastres efectuados sobre el fondo. Estos métodos de exploración cubrían superficies muy reducidas, y las malas condiciones de las muestras una vez recuperadas a bordo apenas permitían atisbar cuál era el estado de los organismos en su hábitat natural o el modo en que se organizaban.

Para fortuna de los investigadores, ese escenario ha cambiado. En la actualidad contamos con medios de observación directa como los robots submarinos teleoperados (ROV, de *remote operated vehicle*), que permiten explorar y registrar imágenes de alta calidad. Pueden trabajar durante horas y cubrir distancias kilométricas. No tienen mayor limitación que la capacidad de trabajo de los técnicos y científicos, y el estado del mar. Además, no dañan los hábitats, con lo que contribuyen a la conservación del medio marino. En suma, han significado un salto metodológico importantísimo. Por fin podemos realizar estudios cuantitativos acerca de la evolución, en el espacio y el tiempo, de las comunidades y de las especies. (Los muestreos, selectivos y puntuales, ya solo son necesarios

EN SÍNTESIS

En el marco de la aplicación de la Red Natura 2000 (el principal instrumento de protección de la biodiversidad de la Unión Europea), se ha llevado a cabo el proyecto Life+Indemares, el mayor reto en el ámbito de la conservación y exploración de los mares en España. Iniciativas similares se han desarrollado en Italia, Francia y Túnez.

Las nuevas técnicas de robótica submarina han permitido explorar de forma exhaustiva los fondos del Mediterráneo. Sorprendentemente, se han hallado zonas muy bien conservadas, con especies abundantes que todavía no se habían descrito y comunidades que recuerdan más a los ecosistemas marinos tropicales.

En esas áreas tan bien conservadas no se practica la pesca de arrastre pero sí la artesanal. Ello sugiere que una propuesta fundamental para la conservación del Mediterráneo pasaría por una reconversión de la flota pesquera, de industrial a artesanal.

LIFE+INDEMARES-ICM-CSIC (*páginas precedentes*)

en el caso de que las imágenes no permitan distinguir las especies.)

Con todo, los ROV también tienen sus limitaciones. No son autónomos y dependen de un cable o «cordón umbilical» que los conecta al barco nodriza que suministra la energía y recibe la información. La longitud del cable, su peso y las posibilidades de que se enrede en cualquier estructura del fondo marino limitan la operatividad.

Por ello se recurre también a los submarinos tripulados. Permiten superar algunas de las restricciones que impone la robótica; son autónomos y pueden llegar a lugares que los ROV no alcanzan (como las paredes verticales de los cañones submarinos), deambular por debajo de cornisas o navegar por valles estrechos entre grandes bloques o montañas submarinas.

Otra posibilidad consiste en emplear robots submarinos autónomos, o AUV (de *autonomous underwater vehicle*) [*véase* «Vehículos autónomos bajo el agua», por Pedro J. Sanz Valero, Pere Ridao y Gabriel Oliver; Investigación y Ciencia, julio de 2012]. Su principal ventaja es que ofrecen una gran autonomía.

Hasta aquí un breve resumen de los factores técnicos que han limitado o facilitado la exploración submarina durante los últimos decenios. Veamos ahora otro de los elementos que han resultado decisivos para el redescubrimiento del Mediterráneo: los grandes proyectos de investigación marina y las políticas conservacionistas europeas.



PUESTA EN EL AGUA del submarino tripulado JAGO (*amarillo*), del centro de investigación oceanográfica GEOMAR, en Kiel, a bordo del buque oceanográfico *García del Cid*, del CSIC, durante las campañas realizadas en el cabo de Creus.

JAGO-GEOMAR-ICM-CSIC

PROTEGER EL MEDIO MARINO, UNA APUESTA DE LA UNIÓN EUROPEA

La conservación de mares y océanos constituye una necesidad apremiante que requiere el desarrollo de medidas de gestión y protección. La mejor herramienta para que la aplicación de las mismas sea eficiente corresponde a la declaración de áreas protegidas. Los mares europeos, con una elevada presión antrópica y pocas áreas marinas verdaderamente protegidas, son los que, en el contexto mundial, quizá necesiten con mayor urgencia la declaración de más espacios protegidos.

En diciembre de 1993, un año después de la segunda Cumbre de la Tierra celebrada en Río de Janeiro, entró en vigor el Convenio sobre la Diversidad Biológica de Naciones Unidas. Dos de sus objetivos eran la conservación de la biodiversidad y el uso sostenible de sus componentes. En 2005, el comité científico asesor estableció la necesidad de que al menos el 10 por ciento de cada región marina y costera estuvieran conservadas. La aplicación de la Directiva Europea de Hábitats (uno de los pilares de Red Natura 2000, el principal instrumento de protección de la biodiversidad en la Unión Europea) sería el camino elegido para alcanzar ese reto. En 2010, ante el lento avance hacia el objetivo establecido, la UE publicó el Plan de Acción para la Biodiversidad. La aplicación completa de la Red Natura 2000 es parte de este plan para detener la pérdida de biodiversidad y de servicios ecosistémicos.

Un año antes nacía el proyecto Life+Indemares, centrado en la aplicación de la Red Natura 2000 en el medio marino, más allá de las zonas costeras. Su objetivo era generar el conocimiento científico necesario para que las propuestas de nuevas áreas marinas protegidas se fundamentaran en su riqueza y valor natural, estado de conservación y funcionalidad ecosistémica. Una propuesta técnicamente ambiciosa, que ha requerido la exploración y el estudio de amplias zonas de la plataforma y el talud continentales, algunas de las cuales se hallan a profundidades de hasta 500 metros.

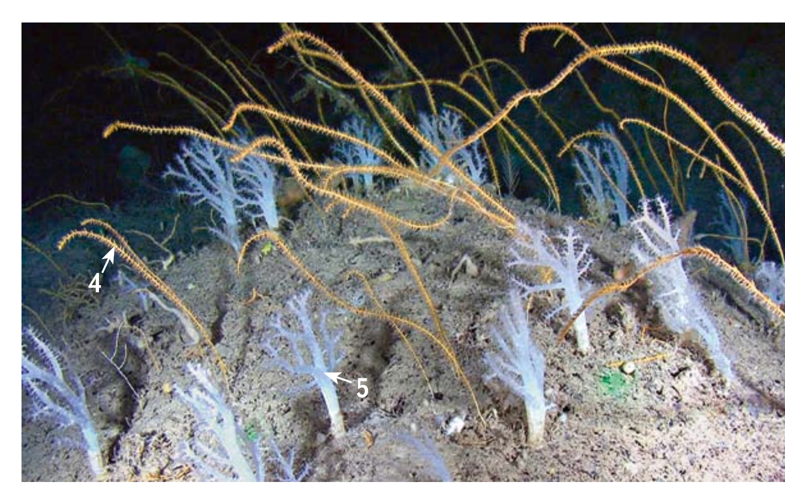
Indemares ha sido el mayor reto de la investigación marina en el ámbito de la conservación y exploración de los mares en España. Con un presupuesto de 15,4 millones de euros (el 50 por ciento de los cuales financiados por la Comisión Europea) y coordinado por la Fundación Biodiversidad (entidad del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente creada en 1998 para proteger el capital natural y la biodiversidad del territorio español), ha contado con la participación de numerosos científicos de varios centros de investigación y universidades.

Durante los seis años de duración del proyecto (2009-2014) se han estudiado diez grandes áreas de las regiones atlántica, mediterránea y macaronésica: el sistema de cañones submarinos de Avilés, el banco de Galicia, los volcanes de fango del golfo de Cádiz, el sur de Almería-Seco de los Olivos, el mar de Alborán, las Islas Columbretes, el sistema de cañones submarinos occidentales del golfo de León, el canal de Menorca, el banco de la Concepción y el espacio marino del oriente y sur de Lanzarote-Fuerteventura.

Como resultado del desarrollo de Indemares, en 2015 la superficie marina protegida en España se había incrementado en 7,3 millones de hectáreas. Esta extensión, sumada a la ya existente, significa la protección del 8,4 por ciento de la superficie marina del Estado.

A continuación presentamos algunos de los hallazgos principales del proyecto sobre los fondos del Mediterráneo, con especial énfasis en los que han cosechado las investigaciones llevadas a cabo desde el Instituto de Ciencias del Mar del CSIC (centro de trabajo de dos de los autores), que se encargó de explorar y estudiar el cañón y la plataforma continental del cabo de Creus (área marina del golfo de León) y la del canal de Menorca, esta última en colaboración con el Instituto Oceanográfico de Baleares del Instituto Español de Oceanografía.





ESPONJAS, CORALES Y GORGONIAS dibujan los paisajes submarinos del Mediterráneo. Las fotografías corresponden a comunidades halladas al final de la plataforma continental e inicio del talud, en el canal de Menorca, a entre 100 y 150 metros de profundidad. A la izquierda, fondo dominado por el coral negro *Antipathella subpinnata* (*1*), esponjas (*2*) y gorgonias (*3*); a la derecha, fondo dominado por la gorgonia *Viminella flagellum* (*4*) y el alcionario *Chironephthya mediterranea* (*5*), una especie nueva para la ciencia.

BOSQUES SUBMARINOS

Los trabajos que realizaron a mediados del siglo pasado investigadores pioneros como Jean-Marie Pérès y Jaques Picard, de la Estación Marina de Endoume en Marsella, constituyen una referencia esencial para el conocimiento integral de las comunidades de los fondos marinos del Mediterráneo y su evolución reciente. Se sabe por ellos que en las plataformas continentales había praderas de pennatuláceos, crinoideos y gorgonias. En zonas donde la columna de agua es muy transparente y la luz llega a mayor profundidad, se extendían praderas de macroalgas como las laminarias.

Entre las comunidades que se descubrieron en los inicios de la exploración profunda del Mediterráneo, destacan las «rocas de mar abierto» (*roche du large*), fondos rocosos situados en el límite de la plataforma continental. Estas albergan una elevada biodiversidad, además de ofrecer refugio a numerosas especies bentónicas (propias de los fondos marinos, lacustres y fluviales) y pelágicas (las que viven alejadas de la costa). Veamos cómo se forman.

Las plataformas continentales son, por su escasa pendiente, zonas de alta sedimentación. Los aportes continentales acarrean hacia el mar grandes cantidades de sedimentos, que se van depositando paulatinamente a lo largo de la plataforma. Las partículas más gruesas se quedan en el litoral (como las arenas o las gravas en las playas); los lodos y las arcillas, mucho más finas y ligeras, viajan hasta zonas más alejadas de la costa.

También el régimen de corrientes influye en los procesos de sedimentación. En la zona media de la plataforma, la velocidad del flujo de partículas se reduce y la fuerza de transporte del agua no logra vencer el peso de estas, que acaban depositándose. Hacia el final de la plataforma, en cambio, se produce un aumento de la pendiente y de la velocidad de las corrientes; ello vuelve a acelerar el tránsito de los sedimentos, que se ven conducidos hacia el mar profundo a través del talud continental. Es en este punto, al final de la plataforma, donde las zonas rocosas quedan descubiertas y emergen sobre un fondo sedimentario.

Esas rocas permiten el desarrollo de ricas comunidades de organismos sésiles (los que viven fijados), cuyas larvas necesitan sustratos duros y sin sedimentos donde poder asentarse y desarrollar las colonias. Entre estos destacan las esponjas, los corales y las gorgonias, bioconstructores de un hábitat tridimensional que favorece la concentración de muchas otras especies que encuentran aquí alimento y refugio. Además de capturar partículas alimenticias (desde microorganismos a todo tipo y tamaño de plancton), las colonias erectas de estos organismos frenan el flujo de agua y, por tanto, de las partículas en suspensión, que quedan a disposición de otras especies. Así, vivir al lado o entre estos «arbustos submarinos» es una ventaja para las especies asociadas. Constituyen por ello uno de los hábitats bentónicos de mayor diversidad biológica del Mediterráneo.

Otro de los máximos exponentes de las comunidades bentónicas son los fondos de corales de aguas frías o de profundidad. Se alojan en la zona alta del talud continental. En el Mediterráneo se extienden hasta los 500 metros de profundidad o más. En su mayor parte están formadas por *Madrepora oculata*, *Lophelia pertusa* y *Dendrophyllia cornigera*. Aquí viven una gran diversidad de especies sésiles y vágiles (que nadan en la columna de agua) asociadas. Junto con los fondos de coralígeno litoral (la comunidad formada por el crecimiento continuado de algas rojas calcáreas, en las cuales se instalan una gran cantidad de especies animales), constituyen auténticos puntos calientes de biodiversidad del Mediterráneo.

Estudios recientes llevados a cabo por el equipo de Covadonga Orejas, del Instituto Oceanográfico de Baleares, han demostrado que los corales de aguas frías crecen mucho más deprisa de lo que se pensaba. El hecho de que medren a más de 150 metros de profundidad haría sospechar que, al igual que muchas especies del mar profundo, serían organismos muy longevos y con una baja tasa de crecimiento. Sin embargo, su desarrollo es relativamente rápido; incluso equiparable al de algunas especies de corales tropicales.

Esta información resulta esencial para gestionar la conservación de estas comunidades. Y nos permite ser optimistas acerca de su recuperación, ya que podría ser viable en décadas —no en siglos—, a partir de solo una mínima población remanente. Bastaría con aplicar medidas tan simples como evitar su perturbación; en particular, la acción de la pesca. Así, al mismo tiempo que se recuperan las poblaciones de corales, se

INDEMARES-ICM-CSIC

restaura su función de hábitat refugio y hábitat trófico para un gran número de especies, lo que permite una mejora del ecosistema entero.

VESTIGIOS DE UN MAR TROPICAL

Las investigaciones realizadas en el cabo de Creus y el canal de Menorca, conducidas respectivamente por Carlos Domínguez Carrió y Jordi Grinyó, del Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona, han hallado una elevada diversidad biológica en estas dos zonas y varias especies nuevas para la ciencia. En el cabo de Creus se ha registrado la presencia de casi un tercio de todas las especies bentónicas conocidas en el Mediterráneo. Resulta sorprendente que algunas de ellas fueran consideradas raras en estas aguas hasta hace muy poco. Nos referimos a los corales blandos del género *Alcyonium*, descubiertos recientemente en el cabo de Creus y todavía en fase de descripción, o la gorgonia *Paramuricea macrospina*, que forma densas praderas en las zonas central y profunda del canal de Menorca.

En colaboración con el equipo de Pablo López González, de la Universidad de Sevilla, hemos descrito especies como el alcionario *Chironephthya mediterranea,* testigo viviente de lo que fue el mar de Tethys hace más de cinco millones de años, cuando el Mediterráneo era tropical. *C. mediterranea* se ha hallado en comunidades en las que también domina la gorgonia *Viminella flagellum,* un paisaje submarino que recuerda más a las profundidades tropicales del mar Rojo que al actual Mediterráneo.

Estudios paralelos llevados a cabo por Marzia Bo y Giorgio Bavestrello, de la Universidad de Génova, corroboran el carácter extraordinario de estos fondos. Estos autores han encontrado en el mar de Liguria unas comunidades similares a las de las costas españolas, dominadas por corales negros, gorgonias, esponjas y alcionarios, y otras especies nuevas para la ciencia. Ambos

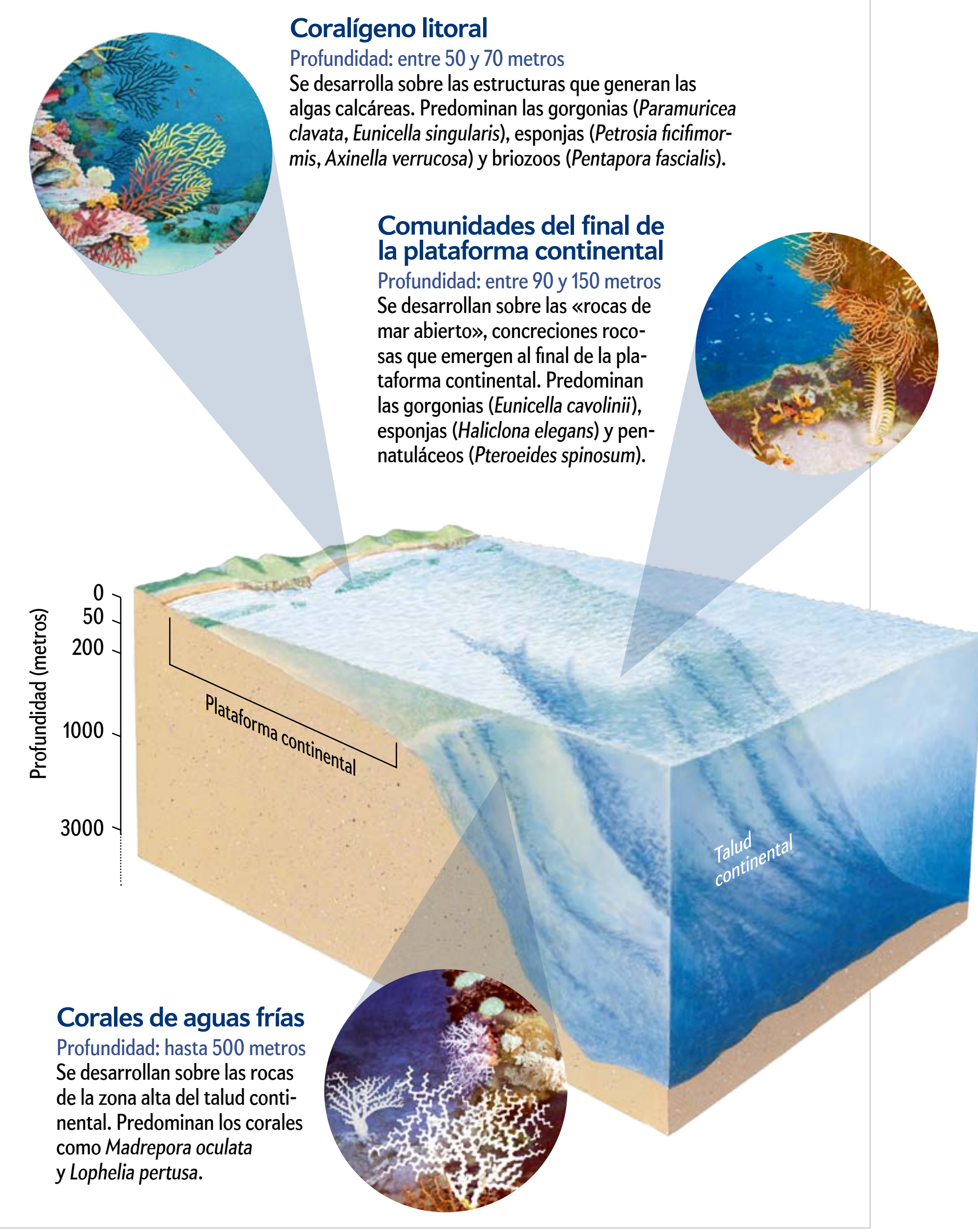
TESOROS ESCONDIDOS

Puntos calientes de biodiversidad submarina

La exploración de los fondos del Mediterráneo que se ha llevado a cabo durante los últimos años ha arrojado luz sobre un paisaje submarino sorprendentemente rico y bien conservado. Bajo las aguas del *mare nostrum* se esconde una elevada biodiversidad, que se concentra sobre todo en tres hábitats: el coralígeno litoral, las comunidades del final de la plataforma continental y los corales de aguas frías o de profundidad.

En estos tres puntos calientes, la vida se desarrolla principalmente alrededor de comunidades de organismos sésiles (los que viven fijados a un sustrato, como esponjas, corales y gorgonias). Estos forman unas densas estructuras tridimensionales que, al frenar el flujo de agua, capturan y retienen partículas en suspensión que sirven de alimento a otras especies vágiles (que nadan en la columna de agua) y móviles (que se mueven sobre el fondo).

Al ofrecer un hábitat refugio y trófico a la vez, estos organismos sésiles desempeñan un papel ecológico de gran importancia para el ciclo de vida de numerosas especies bentónicas. También la plataforma continental cumple una función clave para el ecosistema submarino: sirve de corredor biológico a muchos peces que, como la merluza y la brótola, recorren un largo camino desde la costa hacia zonas más profundas y alejadas en busca alimento.



JORDI CORBERA PARA «EL MAR A FONDO», ICM-CSIC-OBRA SOCIAL «LA CAIXA» (*fondo marino y coralígeno litoral*); *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA (comunidades del final de la plataforma y corales de aguas frías)*

fondos, menorquines y ligurinos, guardan mayor semejanza con los del océano Índico que con otras zonas más superficiales del Mediterráneo.

Otro ejemplo de la riqueza natural de estas comunidades semiprofundas (situadas a entre 100 y 400 metros) corresponde al arrecife de poliquetos en estado subfósil (todavía en proceso de fosilización) que se halló a unos 120 metros de profundidad en la parte alta del cañón submarino del cabo de Creus y que se dató en unos 11.000 años de antigüedad. De acuerdo con Claudio Lo Iacono, del Centro Oceanográfico Nacional en Southampton, estos restos indican dónde se encontraba el nivel del Mediterráneo durante la última glaciación. Se trata de un tipo de registros muy escasos, ya que la cota de entre 110 y 130 metros de profundidad ha sido barrida por movimientos naturales de sedimentos durante cientos de años y ha sufrido el impacto de la pesca industrial en las últimas décadas.

SI TE INTERESA ESTE TEMA...



Descubre *Biología marina*, nuestro monográfico de la colección TEMAS que recoge los mejores artículos de *Investigación y Ciencia* sobre las adaptaciones de los organismos marinos y su importancia en el ecosistema.
www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/65

FUNCIÓN ECOLÓGICA DE LAS COMUNIDADES PROFUNDAS

Además de concentrar una elevada biodiversidad, las comunidades bentónicas que medran al final de la plataforma y en la parte superior del talud continental desempeñan un papel ecológico de gran importancia. Sobre todo en el ciclo de vida de numerosas especies, incluidas algunas de interés comercial, como la merluza y la gamba.

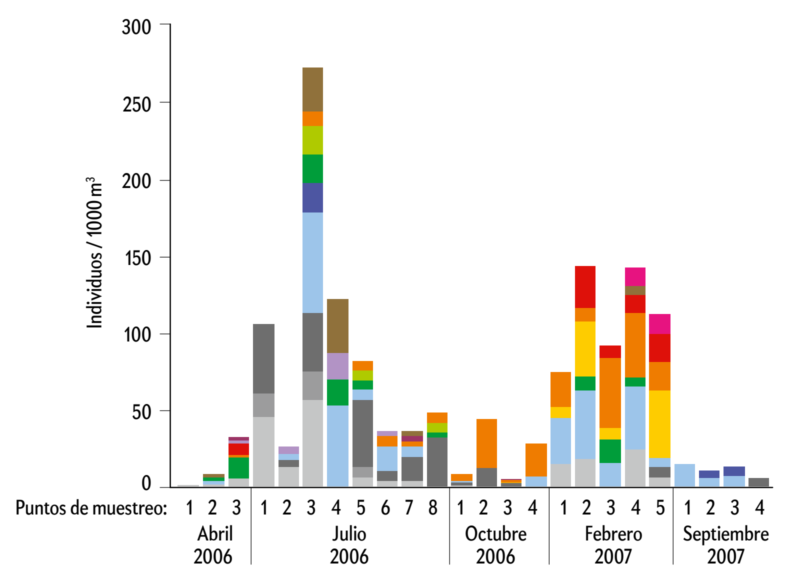
En el cañón de Creus hemos observado grandes enjambres de los organismos que constituyen el zooplancton, como los eufausiáceos (más conocidos como krill), asociados a los bancos de corales de aguas frías. Los enjambres hallados en las paredes del cañón son de tal densidad (miles de individuos por metro cúbico) que la ventana del submarino quedó cubierta de una masa de color rojizo al ser atraídos estos pequeños crustáceos por los focos del aparato.

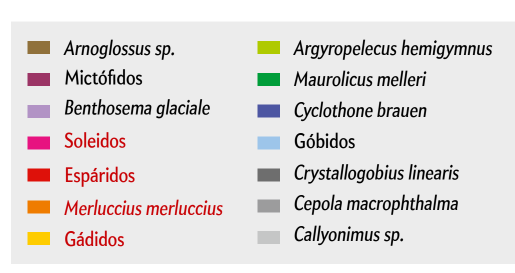
Las investigaciones de Ana Sabatés, del Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona, han confirmado una gran abundancia y diversidad de larvas de especies de peces en esta zona. Destacan las de merluza europea (*Merluccius merluccius*), hasta ahora raramente halladas en el Mediterráneo. En las capturas de plancton efectuadas con redes arrastradas muy cerca de las paredes del cañón también se recogieron larvas de especies de peces comunes en el mar profundo, como mictófidos, e incluso de especies litorales, como góbidos.

Es conocida también la importancia que estos cañones submarinos tienen para las ballenas. Aunque no tuvimos la oportunidad de observar ninguna durante nuestras inmersiones, estos cetáceos se adentran en los cañones para alimentarse del krill en su camino migratorio hacia el golfo de Génova y su zona de reproducción, protegida gracias al primer ejemplo de área protegida internacional en el Mediterráneo, el Santuario de Ballenas del mar de Liguria.

Desde la costa hacia mar abierto hemos observado dos zonas en las que el número de especies animales y su densidad o abundancia es máxima. La primera, más superficial, se sitúa a entre 50 y 70 metros de profundidad y se halla asociada a las comunidades del coralígeno. Aunque la luz se extingue rápidamente en el mar, a esta profundidad la energía lumínica permite el crecimiento de estructuras biogénicas formadas sobre todo por algas calcáreas. La masa coralígena alberga una gran cantidad de especies que viven en el interior de la estructura calcárea, en su superficie y asociadas a las especies sésiles de mayor tamaño que crecen encima y alrededor de las concreciones calcáreas. Este carácter de estructura «viva» hace que el coralígeno constituya (lo mismo que las comunidades del final de la plataforma mencionadas) un hábitat trófico y refugio para muchas especies de animales sésiles, vágiles y móviles (las que, como los crustáceos decápodos y los moluscos, se mueven sobre el fondo marino).

El segundo punto caliente de biodiversidad corresponde a las «rocas de mar abierto» que hemos comentado antes: las comunidades que se forman en las concreciones rocosas que emergen al final de la plataforma continental.



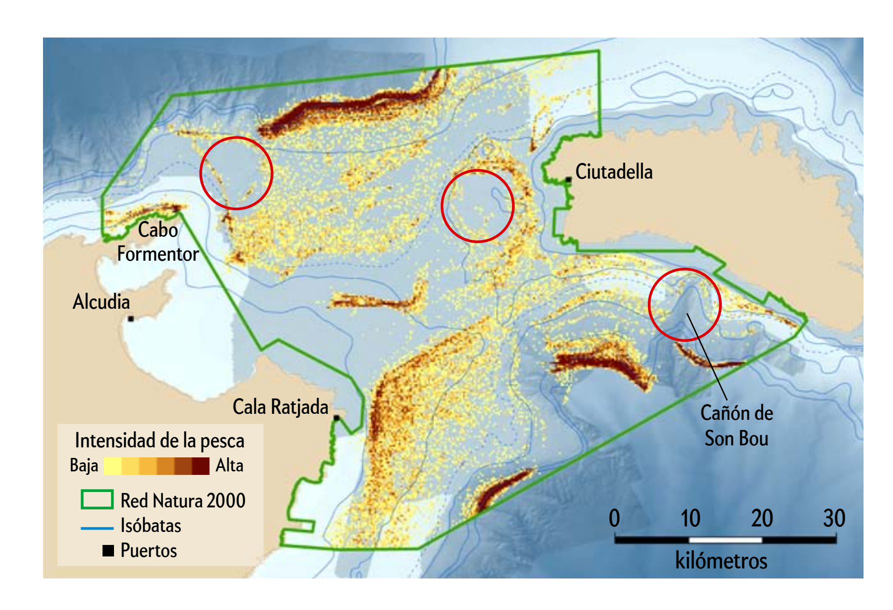


LOS ENJAMBRES DE ZOOPLANCTON que se han hallado asociados a los corales profundos del cañón del cabo de Creus presentan una gran abundancia y riqueza. La gráfica muestra la densidad y los tipos de larvas de distintas especies de peces que se han encontrado. Destaca su estacionalidad (más abundantes en verano, después del desove) y la presencia de especies de interés comercial (*en rojo*), como la merluza (*Merluccius merluccius*).

ANA SABATÉS (ICM-CSIC)

Entre ambas zonas de máxima diversidad se extiende la plataforma continental, una superficie que opera como corredor biológico para muchas especies en su tránsito desde las zonas costeras a las profundas. Entre ellas destaca la merluza y otras especies bentónicas que se desplazan a lo largo de las plataformas en busca de refugio y alimento. Las grandes concentraciones de krill en la parte alta de las paredes del cañón del cabo de Creus pueden ser el alimento de peces como la brótola (*Phycis phycis*), propia de hábitats más litorales pero que se desplaza a las zonas profundas para alimentarse.

La función de corredor que desempeñan las plataformas continentales en el ciclo biológico de numerosas especies justifica la necesidad de afrontar la protección y gestión de las áreas marinas con una visión ecosistémica, que contemple la dimensión espacial y la distribución de los hábitats que conectan el litoral con las zonas profundas.



MAPA DE LA INTENSIDAD DE LA PESCA DE ARRASTRE en el canal de Menorca. Las áreas en las que apenas se ha arrastrado coinciden con las que albergan las comunidades bentónicas mejor conservadas y prácticamente desconocidas (*círculos rojos*).

JORDI GRINYÓ Y SUSANA REQUENA (ICM-CSIC)

EFECTOS DE LA PESCA Y LA CONTAMINACIÓN

El redescubrimiento de estos fondos marinos ha permitido su estudio detallado y, sobre todo, dar a conocer un patrimonio natural que se temía desaparecido a causa del impacto de la pesca. En el transcurso de los últimos decenios, buena parte de la plataforma continental del Mediterráneo ha sido barrida por embarcaciones de pesca de arrastre. Esta técnica destruye por completo los hábitats del fondo marino y su ejercicio continuado hace casi imposible la recuperación de las comunidades bentónicas [*véase* «El fondo esquilmado», por Lucas Laursen; Investigación y Ciencia, septiembre 2014, *y* «Mares esquilmados», por Daniel Pauly y Reg Watson; Investigación y Ciencia, septiembre de 2003].

Al tener georreferenciadas las zonas del canal de Menorca con comunidades bien conservadas, pudimos establecer algunas hipótesis acerca de su existencia. Cuando cotejamos el mapa de esos puntos calientes de biodiversidad con un mapa de la presión pesquera industrial, observamos que en las zonas de alta diversidad la actividad de arrastre era casi inexistente. En cambio, en la parte media del canal, en donde se habían hallado densas praderas de la gorgonia *P. macrospina*, sí se constató el desarrollo de una actividad pesquera continuada, pero de tipo artesanal.

Parece, pues, que la pesca respetuosa con el fondo marino puede coexistir con los hábitats bentónicos. En la pesca con trasmallos, por ejemplo, la limpieza del aparejo a bordo reduce notablemente el impacto de la técnica: la fauna atrapada en las redes (colonias de gorgonias y esponjas, por ejemplo) se devuelve al mar inmediatamente, permitiendo la supervivencia de la misma en su hábitat.

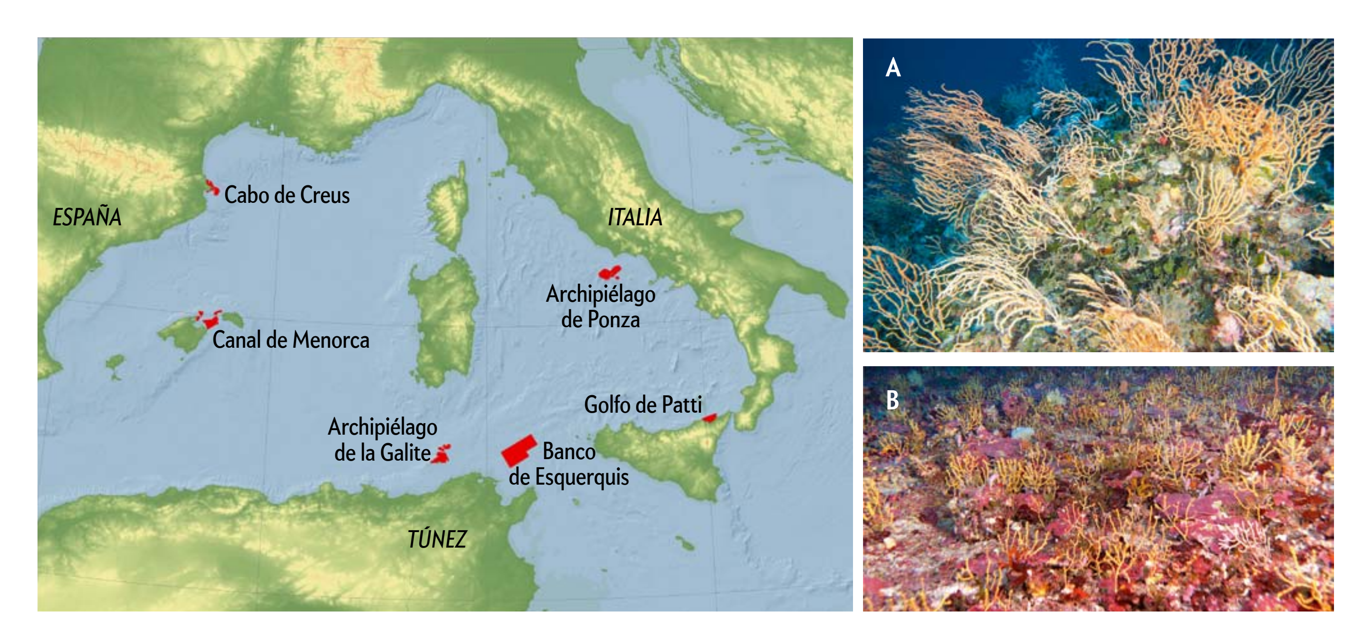
David Díaz, del Instituto Oceanográfico de Baleares, ha investigado otro factor que reduce la presión sobre los ecosistemas marinos: la estacionalidad de la pesca artesanal. La de langosta, por ejemplo, se realiza solo en los meses de primavera y principios de verano. De hecho, son las mismas cofradías de pescadores artesanales las que se encargan de autogestionar la zona en la que pescan. Establecen la presión pesquera mediante la regulación del número de barcas activas y la captura permitida; asimismo, negocian la exclusividad para faenar en las zonas de interés con otros sectores como el de arrastre.

¿Es posible mantener una actividad pesquera artesanal que sea compatible con la conservación de los hábitats bentónicos en la plataforma? Esta es la pregunta que nos propusimos responder al diseñar y ejecutar ECOSAFIMED (de *Towards Ecosystem Conservation and Sustainable Artisanal Fisheries in the Mediterranean Basin*, «Conservación del ecosistema y pesca artesanal sostenible en la cuenca Mediterránea»), el estudio que continuó la línea de investigación de Indemares dentro del Instrumento Europeo de Vecindad y Asociación (también conocido por sus siglas en inglés, ENPI), el mecanismo financiero de la política europea de vecindad que permite realizar proyectos con otros países de la cuenca del Mediterráneo. Junto con la Fundación Biodiversidad y los equipos de Italia (Universidad de Génova) y Túnez (Instituto Nacional para las Ciencias y Tecnologías Marinas), estudiamos seis zonas del Mediterráneo que sufren la presión de la pesca en diferentes niveles de intensidad.

La respuesta no es sencilla. Obviamente, depende de cómo, dónde y cuándo se pesque. Depende de que la pesca sea no solo sostenible, sino también responsable y respetuosa con el sistema marino. Innovar en técnicas y aparejos sin duda contribuirá a la viabilidad futura de esta actividad.

En el cabo de Creus también hemos encontrado comunidades en un estado de conservación excepcional. En este caso son los factores geomorfológicos y ambientales los que han impedido la extensión de la actividad pesquera en la zona. En las proximidades de la parte alta del margen del cañón y en la misma plataforma continental, las barras de roca emergente dificultan el trabajo de las redes del arrastre y entrañan un grave riesgo de pérdida del aparejo. Solo algunos patrones muy diestros en el manejo de sus artes se atreven a faenar en estas zonas. Asimismo, la frecuencia y la intensidad de fuertes vientos de componente norte, como la tramontana, hacen muy difícil salir a pescar en determinadas épocas del año, sobre todo a pocas millas de la costa. Todo ello favorece la preservación de los hábitats del fondo.

Pero la actividad pesquera no es el único factor responsable de la destrucción de la biota de las zonas costeras o de plataforma. También la contaminación resulta dañina: nos referimos



ÁREAS ESTUDIADAS EN EL PROYECTO ECOSAFIMED (ENPI-UE) en las que se han encontrado comunidades muy bien conservadas. Se trata de zonas donde no hay pesca industrial, aunque sí artesanal. Las fotografías corresponden a fondos del archipiélago de Ponza (*A*) y del archipiélago de la Galite (*B*), ambos dominados por esponjas y gorgonias a entre 90 y 100 metros de profundidad.

al aporte de sedimentos y basuras procedentes de la costa, que llegan a través de descargas fluviales y de emisarios [*véase* «Basuras a mares», por Miquel Canals y Galderic Lastras; Investigación y Ciencia, octubre de 2016]. El resultado es un paisaje fragmentado, formado por pequeños parches de la biota originaria en una matriz de un fondo marino más o menos degradado.

UNA APUESTA DE FUTURO

Según los resultados del proyecto Life+Indemares, más del 25 por ciento de las áreas estudiadas en el cabo de Creus y el canal de Menorca corresponde a zonas que hoy en día aún gozan de un buen estado de conservación. Sin desatender al resto de la extensión de estos Lugares de Importancia Comunitaria (LIC), estos núcleos merecen una gestión específica como gérmenes de recuperación a partir de los cuales podría restaurarse gran parte del hábitat degradado.

Es necesario dar un salto hacia adelante en la gestión de los espacios marinos protegidos. Además de conservar el patrimonio natural existente, debería contemplarse la recuperación de las zonas degradadas. Para ello resulta fundamental la aplicación de planes de gestión orientados a reducir las actividades humanas responsables de esa degradación. En muchas ocasiones, esto es ya de por sí suficiente para que se inicie espontáneamente la recuperación del medio.

En paralelo, acciones de restauración ecológica pueden facilitar la ocupación del espacio e incrementar la velocidad de regeneración. Estas estrategias se han ensayado con éxito en zonas tropicales como las Seychelles, el Caribe, Hawái y Australia, donde se está llevando a cabo el trasplante masivo de corales en áreas degradadas con la finalidad de restablecer arrecifes dañados.

Una técnica parecida se ha empezado a implementar en el cabo de Creus, en el marco del proyecto ShelReCover de la Universidad de Barcelona y el Instituto de Ciencias del Mar del CSIC financiado por la Fundación BBVA y con la colaboración de la Fundación Biodiversidad. Gracias a la colaboración con algunos de los pescadores artesanales de la zona, se han ido recogiendo y manteniendo vivas las gorgonias que de vez en cuando se quedan enganchadas en las redes de pesca. Estas se han trasplantado sobre unas estructuras artificiales que se han vuelto a colocar en el fondo de la plataforma continental, a unos 85 metros de profundidad. Mediante un ROV del equipo Vicorob de la Universidad de Gerona, se está estudiando la supervivencia de las gorgonias recuperadas, así como su posible función en la recolonización de las zonas limítrofes.

Todos estos proyectos están explorando nuevas maneras de definir, gestionar y conservar los ecosistemas del fondo del Mediterráneo, contribuyendo a restaurar los hábitats originales y su función ecosistémica. Tenemos medios y esperanza en los resultados. IyC

PARA SABER MÁS

Deep coral oases in the South Tyrrhenian Sea. M. Bo et al. en *PLOS ONE*, vol. 7, e49870, 2012.

Bathymetrical distribution and size structure of cold-water coral populations in the Cap de Creus and Lacaze-Duthiers canyons (northwestern Mediterranean). A. Gori et al. en *Biogeosciences*, vol. 10, págs. 2049-2060, 2013.

***Chironephthya mediterranea* n. sp. (Octocorallia, Alcyonacea, Nidaliidae), the first species of the genus discovered in the Mediterranean Sea.** P. J. López-González et al. en *Marine Biodiversity*, vol. 45, págs. 667-688, 2015.

Diversity, distribution and population size structure of deep Mediterranean gorgonian assemblages (Menorca channel, western Mediterranean Sea). J. Grinyó et al. en *Progress in Oceanography*, vol. 145, págs. 42-56, 2016.

Página web del proyecto Life+Indemares: **www.indemares.es**

EN NUESTRO ARCHIVO

La salud de mar mediterráneo. Joandomènec Ros en *IyC*, agosto de 1994.

Pesca sostenible. Carlos Domínguez, Josep Maria Gili y Jordi Grinyó en *IyC*, enero de 2011.

El Mediterráneo, un delicado océano en miniatura. Javier Ruiz Segura y Joaquín Tintoré en *IyC*, abril de 2016.





Pobreza y cerebro infantil

Los niños que crecen en un ambiente socioeconómico desfavorecido presentan variaciones notables en el desarrollo cerebral. ¿Podría una ayuda económica prevenir el daño?

Kimberly G. Noble

Crecer pobre hace algo más que dejar a mil millones de niños y adolescentes de todo el mundo sin bienes materiales básicos. Implica un riesgo mucho mayor de que su cerebro no se desarrolle al ritmo que, en circunstancias normales, lo convertiría en un milagro de kilo y medio capaz de realizar todo tipo de proezas intelectuales, ya sea componer sinfonías o resolver ecuaciones diferenciales.

En comparación con sus congéneres más pudientes, los niños pobres tienden a obtener peores resultados en las pruebas de cociente intelectual, lectura y otras. Es también menos probable que terminen la enseñanza secundaria, accedan a la universidad y obtengan un título. Y, a su vez, se muestran más propensos a seguir siendo pobres y conseguir trabajos precarios en la adultez. Ninguna de estas correlaciones es nueva, y el desarrollo cerebral no es más que uno de los múltiples factores que intervienen en ellas. Sin embargo, hasta la pasada década no teníamos más que una idea extremadamente vaga sobre el verdadero impacto de la pobreza en el desarrollo del cerebro.

Mi laboratorio y otros han comenzado a explorar la relación entre el estatus socioeconómico de una familia (una medida que combina ingresos, nivel educativo y prestigio profesional) y la salud cerebral de los niños. Hemos encontrado que las dificultades socioeconómicas se encuentran asociadas a tremendas diferencias en el tamaño, la forma y el funcionamiento del cerebro infantil.

Averiguar hasta qué punto la pobreza podría comprometer el desarrollo normal del cerebro nos ha llevado a proponer un remedio sencillo para aliviar el problema. Estamos diseñando un estudio con el fin de evaluar qué efecto ejercería en la salud de los niños que sus familias recibieran una ayuda económica. Se trata de la primera investigación que pretende averiguar si un aumento modesto de los ingresos podría contribuir a mejorar el desarrollo cerebral infantil. Si tenemos éxito, el resultado podría marcar un camino que ligase de forma directa la neurociencia básica con la formulación de políticas públicas.

EN BUSCA DE RESPUESTAS

Mi investigación comenzó hace 15 años, cuando era estudiante de posgrado en la Universidad de Pensilvania. Por entonces, mi directora de tesis, Martha Farah, deseaba profundizar en la relación entre pobreza y desarrollo temprano del cerebro. Por suerte para mí, me propuso que me convirtiera en la primera de sus estudiantes que abordaría el problema.

Kimberly G. Noble es profesora de neurociencias y educación en la Universidad de Columbia. Su investigación se centra en el efecto de las diferencias socioeconómicas en las facultades cognitivas y el desarrollo del cerebro infantil.



El proyecto exigía deliberar con cuidado sobre la metodología. Las técnicas más llamativas eran las de neuroimagen: potentes equipos capaces de revelar tanto la estructura (qué aspecto tiene) como la función (cómo opera) del cerebro. Sin embargo, la técnica es también cara: un solo escáner suele costar cientos de dólares, sin incluir la remuneración a los participantes y a los técnicos que analizan los datos.

Dado que nos enfrentábamos a un tema de investigación inexplorado, decidimos buscar métodos sencillos, asequibles y que nos permitieran reclutar el máximo número de participantes. Al final encontramos una solución simple y directa: usar pruebas estandarizadas para medir las facultades cognitivas. A diferencia de otros estudios previos sobre las consecuencias de la pobreza, decidimos no fiarnos de los índices generales de rendimiento académico, como las tasas de graduación en secundaria. Ello se debe a que ninguna parte del cerebro es responsable de que completemos nuestros estudios. Son varios los circuitos neurales implicados en las distintas facultades cognitivas que resultan clave para tener éxito en la escuela y en la vida. Por ejemplo, sabemos que cuando una persona desarrolla lesiones en la zona de Wernicke (una región del hemisferio izquierdo), experimenta dificultades de comprensión lingüística. Gracias a los estudios de neuroimagen, sabemos también que los individuos sanos usan esa misma zona cuando escuchan a otra persona. Todo ello permite deducir que las personas sanas emplean dicha región cerebral cuando participan en una tarea que implica escuchar y comprender el habla. No hace falta tomar neuroimágenes una y otra vez para confirmarlo.

Así pues, decidimos usar tests psicológicos consolidados para evaluar las capacidades lingüísticas de los niños sin someterlos a un escáner. La pregunta que nos planteamos fue: ¿qué relación existe entre las disparidades socioeconómicas y el funcionamiento del cerebro?

Para ello reclutamos a varios grupos de familias pertenecientes a distintos estratos socioeconómicos y con hijos entre el jardín de infancia y la adolescencia. Los niños fueron sometidos a diversas pruebas cognitivas, las cuales nos proporcionaron una medida de la integridad de los diferentes circuitos cerebrales. Vimos que, en general, quienes procedían de hogares más desfavorecidos tendían a obtener peores resultados en las pruebas lingüísticas y de memoria, así como en las destinadas a medir la capacidad de autocontrol y de evitar distracciones.

No obstante, en algunos casos sí nos fue necesario acceder a técnicas de imagen avanzadas, pues queríamos determinar si el estatus socioeconómico guardaba relación con las diferencias en el tamaño y la forma de algunas de zonas clave implicadas

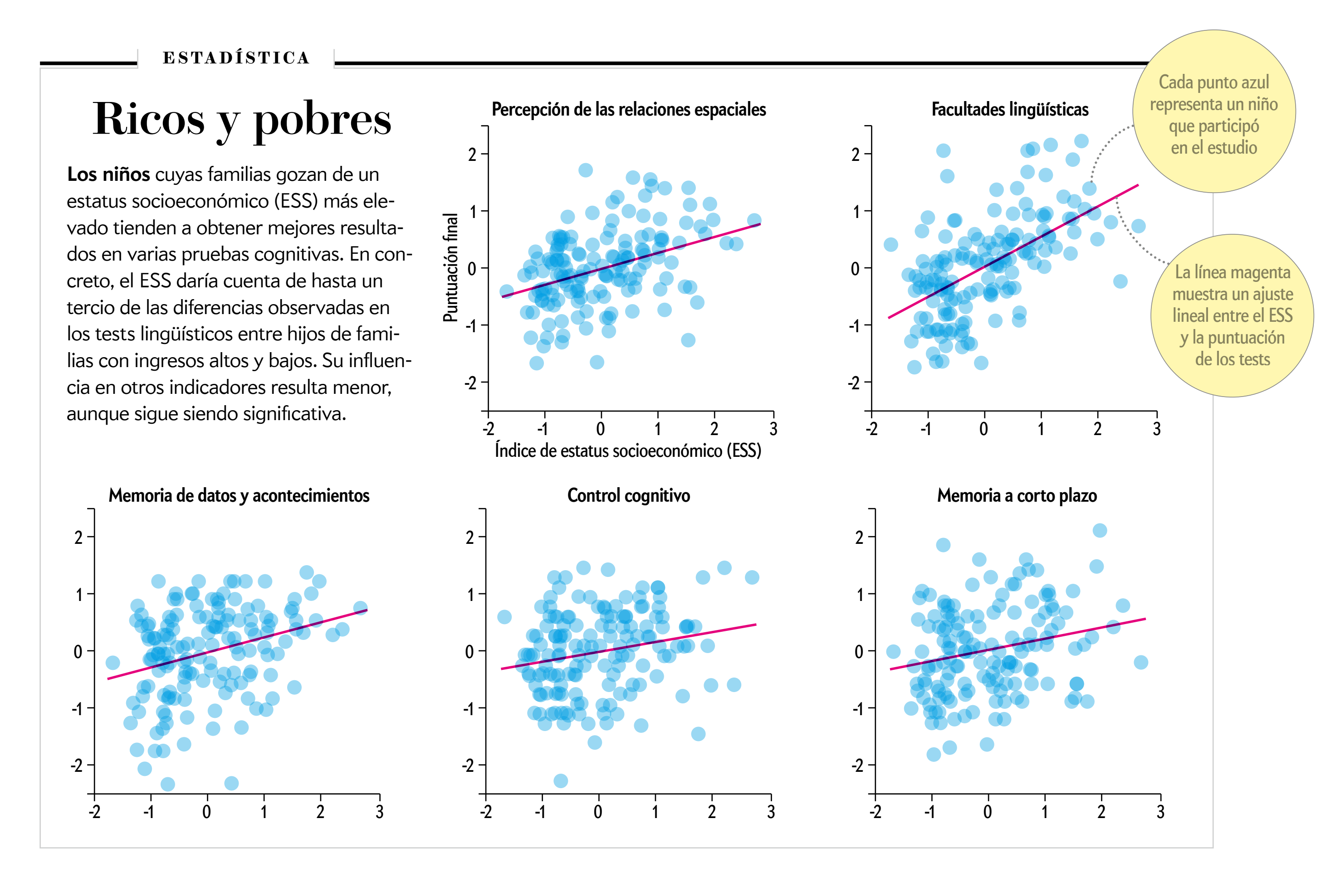
EN SÍNTESIS

Los niños que crecen en la pobreza tienden a obtener peores resultados en un gran número de pruebas. Estadísticamente, son más propensos a no acabar la secundaria, a no ingresar en la universidad y a acabar obteniendo empleos precarios.

Varias investigaciones han observado una correlación entre el estatus socioeconómico de una familia y el desarrollo del cerebro de los niños, con variaciones en el tamaño, la forma y el funcionamiento de distintas partes del órgano.

El potencial de la pobreza para comprometer el desarrollo cerebral infantil ha llevado a los científicos a preguntarse si una ayuda económica a las familias podría mitigar el efecto. Un estudio futuro analizará la cuestión.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES (*niños*); PETER HORVATH (*composición*)



FUENTE: «SOCIOECONOMIC GRADIENTS PREDICT INDIVIDUAL DIFFERENCES IN NEUROCOGNITIVE ABILITIES», KIMBERLY G. NOBLE ET AL. EN *DEVELOPMENTAL SCIENCE*, VOL. 10, N.º 4, PÁGS. 464-480, JULIO DE 2007; AMANDA MONTAÑEZ (*gráficos*)

en procesos cognitivos superiores. Hasta ahora, cuatro grupos independientes han hallado que los niños cuyos padres ganan sueldos más elevados suelen tener un hipocampo mayor. Ubicada en las profundidades del cerebro, esta región desempeña un papel clave en la formación de recuerdos.

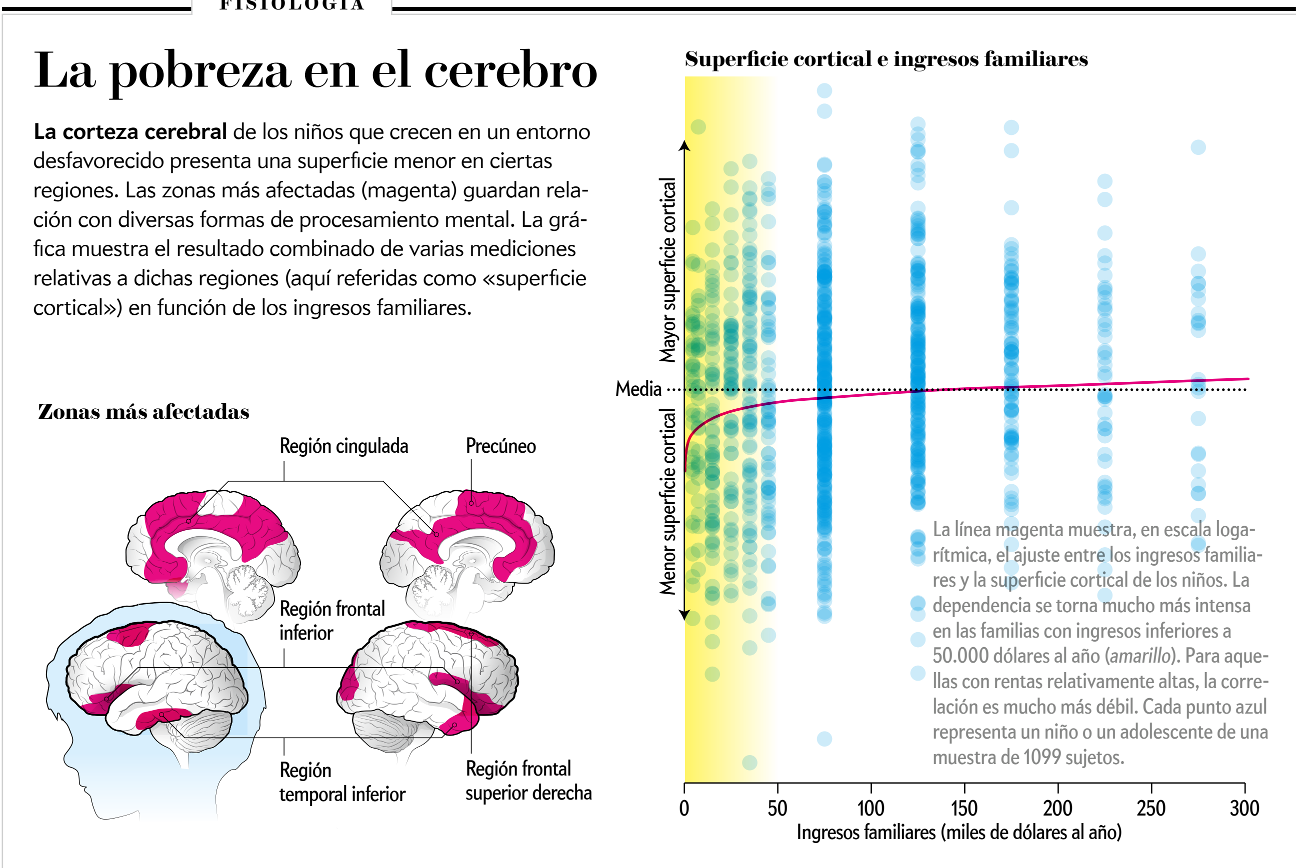
Otros estudios han examinado el tamaño y la forma de la corteza cerebral, la capa externa y llena de circunvoluciones que ejecuta la mayor parte del trabajo cognitivo «pesado». En concreto, varias investigaciones han examinado si el estatus socioeconómico guarda relación con el volumen de la corteza. Para entender a qué nos referimos al hablar de volumen, piense en una lata de tomate. Su volumen (la cantidad de tomate en su interior) se obtiene multiplicando el área de la tapa por la altura del recipiente. Al considerar la corteza del cerebro, hablamos, respectivamente, de la superficie y del espesor cortical.

Las mediciones del volumen cortical deben efectuarse con cuidado, ya que un mismo volumen puede corresponder a una gran superficie y un espesor pequeño, o a una superficie reducida y un espesor generoso. Sabemos que el grosor de la corteza tiende a disminuir con la edad (en nuestro ejemplo, la lata de tomate menguaría hasta la altura de una lata de atún); sin embargo, la superficie cortical aumenta con el paso de los años. Hace poco, con la ayuda de las herramientas informáticas adecuadas, nos propusimos investigar si las disparidades socioeconómicas se reflejarían en la superficie y el espesor cortical.

En el estudio más extenso realizado hasta ahora, publicado en 2015 en *Nature Neuroscience,* analizamos la estructura cerebral de 1099 niños y adolescentes de familias con condiciones económicas diversas y residentes en diez localidades de todo Estados Unidos. Descubrimos que tanto los logros educativos de los padres como los ingresos familiares estaban asociados a diferencias en la superficie de la corteza. Por ejemplo, los hijos de familias que ingresaban menos de 25.000 dólares al año presentaban un 6 por ciento menos de superficie cortical que aquellos cuyos hogares ganaban más de 150.000 dólares. Estas correlaciones se observaban en la mayor parte del cerebro, pero resultaban más pronunciadas en las regiones asociadas al lenguaje y en aquellas encargadas del control de los impulsos y otras formas de autorregulación; es decir, las mismas facultades cognitivas en las que otros estudios ya habían detectado diferencias en función del estrato socioeconómico.

Nuestro trabajo tuvo en cuenta distintas variables. Como indicador aproximado de raza, consideramos la proporción del bagaje genético de cada individuo con respecto a seis grandes poblaciones: africana, centroasiática, asiática oriental, europea, americana indígena y oceánica. Los datos mostraron que las disparidades socioeconómicas que quedaban reflejadas en la estructura cerebral resultaban independientes de dicha noción genética de raza.

También observamos notables diferencias entre individuos. Por ejemplo, algunos de los niños y adolescentes de hogares desfavorecidos presentaban superficies corticales mayores que otros de familias más pudientes. Un fenómeno similar lo hallamos en la relación entre sexo y altura: sabemos que los chicos son más altos que las chicas, pero en la escuela primaria no faltan casos de niñas que miden más que sus compañeros varones. Del mismo modo, aunque los hijos de familias con mayores ingresos tendían a mostrar una superficie cortical mayor, al considerar un individuo concreto, resultaba imposible predecir su tamaño cerebral a partir únicamente de los ingresos familiares.



Por otro lado, la relación entre economía familiar y superficie cortical se tornaba más acusada en la población con menos ingresos, pero tendía a equilibrarse en los segmentos más elevados. Es decir, al considerar qué ocurre con cada dólar de más, en las familias más desfavorecidas las diferencias de renta están asociadas a diferencias proporcionalmente mayores en la estructura del cerebro.

En otro estudio reciente hemos analizado la relación entre disparidad socioeconómica y espesor cortical. En general, el grosor de la corteza suele disminuir con la edad. Sin embargo, nuestro trabajo sugiere que las circunstancias socioeconómicas pueden influir en el proceso. En los niveles más bajos, el espesor cortical tendía a menguar de manera abrupta en épocas más tempranas de la infancia; en cambio, al aumentar el estatus socioeconómico, el grosor de la corteza iba reduciéndose de manera más gradual hasta el final de la adolescencia.

Estos resultados concuerdan con los de otros grupos que sugieren que, en ciertos casos, las adversidades parecen acelerar la maduración del cerebro infantil; es decir, provocan que el órgano «crezca» más rápido. Esa reducción acelerada del espesor cortical indica que el cerebro de muchos niños pobres podría carecer de la plasticidad necesaria: la capacidad para modificar su estructura y adecuarse al aprendizaje propio de la infancia y la adolescencia [*véase* «La plasticidad del cerebro adolescente», por Jay N. Giedd; Investigación y Ciencia, agosto de 2015].

Por descontado, una de las preguntas más importantes a las que hubimos de hacer frente fue si las diferencias en la estructura cerebral afectaban a las facultades cognitivas del niño. Las disparidades observadas en la superficie cortical parecían confirmar en parte hallazgos previos, según los cuales una renta familiar alta favorece la capacidad de un niño para prestar atención y reprimir conductas inadecuadas. La investigación de Seth Pollak, de la Universidad de Wisconsin-Madison, y otros estudios de John Gabrieli, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, sugieren que las variaciones en la estructura cerebral (en el volumen o el espesor corticales) pueden explicar entre el 15 y el 44 por ciento de la brecha en el rendimiento educativo de los adolescentes de familias con bajos ingresos.

CORRELACIÓN NO IMPLICA CAUSALIDAD

Aunque persuasiva, esta línea de investigación aún se encuentra en ciernes. Todavía hemos de averiguar qué causa la relación entre el estatus socioeconómico de un niño y su desarrollo cerebral. ¿Se debe a variaciones en la nutrición, el vecindario, la calidad escolar, el trato que recibe de los padres, el estrés familiar o a una combinación de todo ello? ¿Tenemos siquiera la certeza de que todas estas diferencias son ambientales, o es posible que la genética también desempeñe algún papel?

Hasta la fecha, pocos estudios han examinado de forma directa estas cuestiones. Un hallazgo reciente de Joan Luby y sus colaboradores, de la Universidad Washington en Saint Louis, ha proporcionado indicios de que la influencia de los ingresos en la estructura cerebral del niño podría achacarse a acontecimientos estresantes y a diferencias en el trato que le ofrecen los progenitores. Al parecer, tener unos padres menos comprensivos y más hostiles conlleva consecuencias negativas; en este caso, un hipocampo menor. En nuestro laboratorio estamos investigando si el estrés crónico y una falta de interacción verbal entre padres e hijos podrían explicar, el menos en parte, estos resultados.

TAMI TOLPA (*ilustraciones del cerebro*); AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*); FUENTE: «FAMILY INCOME, PARENTAL EDUCATION AND BRAIN STRUCTURE IN CHILDREN AND ADOLESCENTS», KIMBERLY G. NOBLE ET AL. EN *NATURE NEUROSCIENCE*, VOL. 18, PÁGS. 773-778, MAYO DE 2015

Otro eterno interrogante es si los problemas que muestran los niños pobres desde pequeños se originan antes de nacer, durante el tiempo que pasan en el útero, o después, como consecuencia de la precariedad económica de la familia. En fecha reciente, nuestro grupo ha observado que la función cerebral durante los primeros cuatro días de vida no guarda relación con el nivel de ingresos de los padres ni con sus logros educativos. Dicho resultado apoya la idea de que la relación entre disparidad socioeconómica y desarrollo del cerebro obedece a experiencias posteriores al nacimiento. Este trabajo debe aún ser replicado, ya que la muestra utilizada en nuestro estudio era relativamente pequeña: tan solo 66 familias. Con todo, las investigaciones de otros grupos sugieren que algunas diferencias estructurales o funcionales del cerebro solo se harían evidentes en momentos posteriores al primer año de vida.

Por el momento, carecemos de pruebas que expliquen la conexión entre el desarrollo del cerebro infantil y las circunstancias familiares, sociales y económicas. Desentrañar la relación entre estatus socioeconómico, experiencia durante los primeros años de vida y desarrollo del cerebro constituye una clara prioridad para la investigación futura.

Aunque hay docenas de estudios que han aportado pruebas sobre la relación entre ingresos familiares y desarrollo cerebral, estas investigaciones aún necesitan apoyarse en suelo firme. El tan citado adagio de que «correlación no implica causalidad» ayuda a explicar la persistente duda: ¿crecer en una familia desfavorecida provoca diferencias en el cerebro infantil, o es un desarrollo cerebral característico lo que hace que algunos niños rindan menos en la escuela o en el trabajo?

La neurociencia se ha mantenido al margen de la cuestión de la causalidad. Para evaluar causa y efecto, es necesario aplicar la prueba científica por antonomasia: un ensayo controlado con dos grupos aleatorizados; uno de tratamiento, sobre el que se lleva a cabo una intervención determinada, y otro de control. Eso nos permitiría evaluar el impacto de una medida concreta en el desarrollo del cerebro.

Para este tipo de estudio, un equipo de investigación necesita sopesar, entre otras cosas, cuál habría de ser la intervención adecuada. En EE.UU. ya existen bastantes programas dirigidos a la escuela y al hogar, como Head Start, del Departamento de Salud y Servicios Sociales, cuyo objetivo consiste en reducir las divergencias en el rendimiento de los niños. Muchos de estos esfuerzos resultan eficaces, por más que a menudo se enfrenten a problemas desalentadores. Con todo, las intervenciones de calidad resultan caras, difíciles de aplicar a gran escala y, con frecuencia, acaban «desvaneciéndose», ya que los efectos positivos comienzan a disminuir con el tiempo toda vez que los niños dejan de recibir los servicios.

A la vista de estas dificultades, nuestro grupo se ha decantado por una intervención mucho más simple: una fácil de administrar y que, en principio, contaría con una aceptación casi total por parte de la comunidad. En concreto, nuestro estudio evaluará los efectos en el desarrollo cerebral de una ayuda económica directa para las familias.

A diferencia del asesoramiento, la atención infantil y otros servicios, una transferencia monetaria facilitaría que las familias tomasen las decisiones económicas que ellas considerasen mejores. Varios estudios en EE.UU. y en países en desarrollo han mostrado que los complementos salariales directos resultan prometedores. La idea de instaurar una renta básica universal está ganando terreno, y varias organizaciones y Gobiernos de todo el mundo están decidiendo ponerla a prueba.

Hasta ahora, sin embargo, ninguno de esos estudios ha evaluado los efectos de un complemento salarial en el desarrollo del cerebro infantil. Nuestro grupo acaba de reunir a un equipo de expertos en ciencias sociales y neurociencia para abordar la cuestión; entre ellos, el economista Greg Duncan, de la Universidad de California en Irvine, la psicóloga evolutiva Katherine Magnuson, de Wisconsin-Madison, el psicólogo Hirozaku Yoshikawa y la economista Lisa Gennetian, ambos de la Universidad Nueva York. En estos momentos estamos recaudando fondos para poner en marcha el primer ensayo aleatorizado que analizará la relación de causa y efecto entre la reducción de la pobreza y el desarrollo del cerebro.

El objetivo es ambicioso, pero la premisa es clara. Empezaremos reclutando a 1000 madres estadounidenses con ingresos bajos en el momento del parto, las cuales serán divididas al azar en dos grupos: el primero recibirá un complemento salarial de 333 dólares al mes, y el segundo de 20. El dinero se desembolsará en una tarjeta de débito, la cual será entregada a las madres y se recargará de forma automática cada mes. No habrá condiciones sobre el uso del dinero.

Durante los tres primeros años de vida del niño, haremos un seguimiento de las familias para evaluar el impacto de esa transferencia incondicional de efectivo en el desarrollo cerebral y cognitivo del pequeño. También examinaremos otros aspectos de la vida en el hogar, como el estrés, la calidad de las relaciones entre los miembros de la familia y la manera en que se usan los fondos recibidos. Un estudio piloto reciente, de un año de duración y con 30 madres de ingresos bajos, sugiere que nuestro enfoque sería viable y que una tarjeta de débito puede servir como medio fidedigno para proporcionar ingresos a las madres. Aunque numerosas participantes nunca habían usado una, tuvieron pocos problemas para activarla, sacar dinero o usarla en comercios. Ello nos anima a pensar que nuestro diseño podría ampliarse a gran escala.

Nuestra hipótesis es que un incremento de los ingresos desencadenará una cascada de efectos positivos para las familias. Y que, tras los primeros años de infancia, los niños experimentarán mejoras en el desarrollo de sus facultades visuales, auditivas y otras capacidades cognitivas clave, al ritmo de quienes crecen en familias con un mayor nivel económico.

Si nuestra hipótesis es correcta, el ensayo tiene el potencial de orientar políticas sociales que afectan a millones de familias desfavorecidas con niños pequeños. Creemos también que tales medidas podrían implantarse con una infraestructura gubernamental sencilla. Tal vez los ingresos no constituyan el único factor que determina el desarrollo de un niño, pero puede que sí sean el más fácil de cambiar a la hora de diseñar políticas sociales: una especie de «anticipo a cuenta» para impulsar el desarrollo saludable del cerebro infantil. IyC

PARA SABER MÁS

Socioeconomic gradients predict individual differences in neurocognitive abilities. Kimberly G. Noble, Bruce D. McCandliss y Martha J. Farah en *Developmental Science*, vol. 10, n.º 4, págs. 464-480, julio de 2007.

Family income, parental education and brain structure in children and adolescents. Kimberly G. Noble et al. en *Nature Neuroscience*, vol. 18, págs. 773-778, mayo de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los años sensibles. Charles Nelson III, Elizabeth A. Furtado, Nathan A. Fox y Charles H. Zeanah, Jr. en *MyC* n.º 46, 2011.

por Robert Frederick

Remolinos de fuego azul

Una forma de combustión repleta de potencial y enigmas

La combinación del poder de los tornados con el de las llamas hace que pocas cosas resulten más destructivas que los remolinos de fuego. Estos pueden causar desastres incluso en el entorno controlado y seguro de un laboratorio.

Elaine Oran, de la Universidad de Maryland, y sus colaboradores estaban experimentando con remolinos de fuego después de observar un vídeo de uno de ellos sobre agua. El vídeo mostraba el resultado de la descarga de un rayo en Kentucky



TODAS LAS IMÁGENES SON CORTESÍA DE HUAHUA XIAO, MICHAEL J. GOLLNER Y ELAINE S. ORAN

LOS REMOLINOS AZULES apenas se producen en la naturaleza, pero se forman fácilmente en espacios cerrados o semicerrados. Ante una ligera variación en el volumen de combustible que los alimenta, pueden pasar de tener unos 6 centímetros de altura (*derecha*), a multiplicar por diez su tamaño (*arriba*).

sobre un almacén lleno de whisky, gran parte del cual se había esparcido sobre un lago cercano y se había incendiado. Al principio el alcohol ardió como un incendio en charco, sin girar. A continuación se formó un extraño remolino de fuego. Oran observó cómo iba atrayendo hacia sí todo el combustible de la superficie, volviéndose cada vez más intenso.

Esa intensidad lo distinguía de los remolinos de fuego originados en incendios forestales, que tienden a producir humo negro con hollín. Otros vídeos confirmaron que los remolinos de fuego que arden por combustible líquido sobre agua producen más humo blanco a medida que se hacen más intensos, lo que indica menor cantidad de hollín y mayor eficiencia.

Así que el equipo comenzó a experimentar con remolinos de fuego a pequeña escala sobre agua. Su recinto tiene un diámetro de 40 centímetros y una profundidad de solo algunos centímetros. Con dos semicilindros de cuarzo ligeramente descentrados para confinar el fuego y permitir que el aire circule verticalmente, el equipo roció un poco de n-heptano (un componente de la gasolina) sobre el agua, lo prendió con un encendedor de butano y se apartó.

Los investigadores a veces usan ventiladores para crear un vórtice, y a continuación añaden combustible y prenden la mezcla. «Si la geometría es correcta para crear el vórtice inicial, no se necesita añadir ninguna rotación», declara Oran. En efecto, poco después de comenzar el incendio en charco, se formó un remolino de fuego. Pero después de tan solo escasos segundos, este se transformó en un pequeño remolino azul, algo que nadie había visto antes.

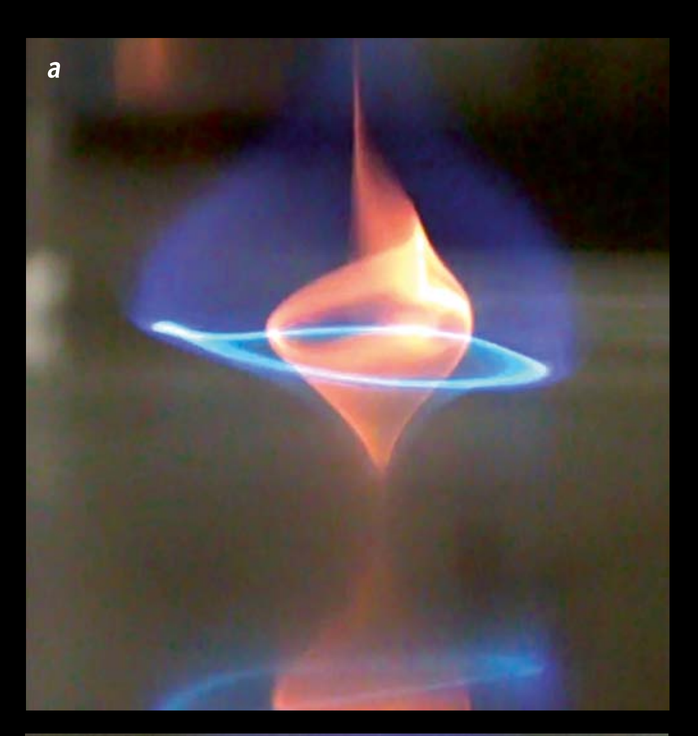
«Creo que nadie había dejado que los remolinos de fuego se fortaleciesen lo suficiente, especialmente los grandes, de manera que pudiera formarse el remolino azul», afirma Oran. El equipo describió sus hallazgos en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.* en agosto de 2016.

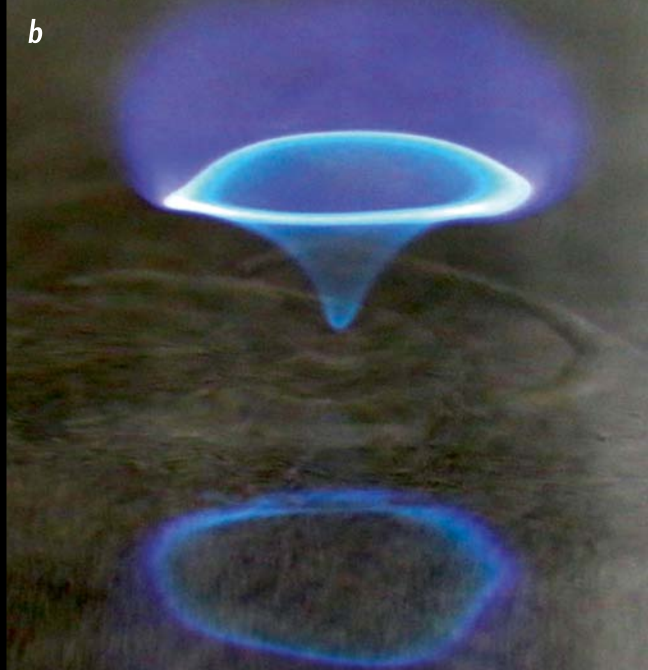
La variación de la configuración y el empleo de paredes cuadradas de confinamiento, en lugar de dos semicilindros, no cambiaron para nada la formación del remolino, y tampoco se observó ningún cambio al usar otros combustibles. El remolino azul se originó sobre petróleo crudo, por lo que este tipo de remolinos podrían emplearse algún día para limpiar las mareas negras si, después de adquirir un buen conocimiento sobre ellos, se averigua cómo usarlos de manera segura.

Pero tal objetivo llevará tiempo. Si bien los experimentos de combustión son bastante sencillos, Oran afirma que «lo difícil es el diagnóstico». Todavía se desconoce la temperatura en el interior de los remolinos azules, aunque se especula que alcanzará unos 2000 grados centígrados. Nadie comprende aún la estructura y la forma del remolino azul, si se puede generar directamente o debe existir previamente un remolino de fuego, o si se forma a mayores escalas. Según Oran, las simulaciones por ordenador revisten una enorme importancia en este caso, ya que permitirían saltarse algunos pasos.

Así que aún hay mucha física que investigar para comprender este fenómeno. Oran lo describe como «una pequeña bestia hambrienta que se desplaza devorándolo todo». O quizá no: «No sabemos la cantidad de combustible que realmente arde en este remolino azul y cuánta se evapora. Tenemos que hacer medidas».

—Robert Frederick





UNA LLAMA AMARILLA indica la producción de hollín (*a*). Eso hace pensar que, cuando un remolino de fuego formado al inyectar y encender combustible sobre agua se transforma en un remolino azul (*b*), el fenómeno obedece a que el combustible arde de manera más eficiente. No obstante, sin conocer con detalle su composición, es imposible saber cuánto combustible se quema y cuánto se evapora de la superficie del agua. La parte inferior curvada del remolino azul, y su parte superior convexa, de color más claro, sugieren a los expertos en dinámica de fluidos que el vórtice que condujo a la formación del remolino azul estaría desapareciendo. Sin embargo, mientras se suministre un flujo constante de combustible al remolino azul (a través de un tubo situado debajo de la superficie del agua), continuará girando en un tranquilo estado estacionario.

por María Jiménez Buedo

María Jiménez Buedo es profesora de filosofía de la ciencia en la UNED.



La filosofía de la economía

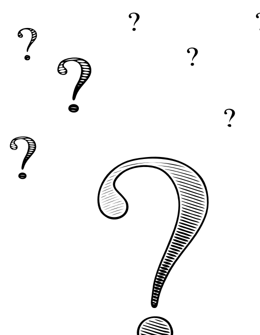
De los modelos predictivos a los métodos experimentales

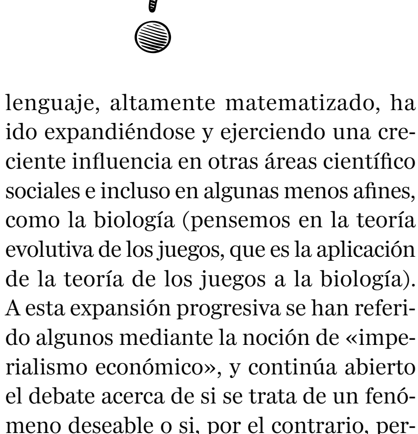
La filosofía de la economía está actualmente estructurada en torno a tres áreas relativamente independientes. En primer lugar, está la que se dedica a las cuestiones epistemológicas, metodológicas y ontológicas que surgen en la práctica científica de los economistas (podríamos considerar que es la parte de la filosofía de la ciencia que se dedica específicamente a la economía). En segundo lugar, está el área dedicada a la teoría de la elección racional, que comparte objeto de estudio con la filosofía de la acción. Y finalmente, tenemos la filosofía política dedicada a la justicia redistributiva.

Dedicaremos este artículo a la primera de esas áreas. En concreto, nos centraremos en dos cuestiones que han dado lugar a interesantes debates filosóficos: la naturaleza de los modelos económicos y el desarrollo de la economía experimental.

El interés público sobre la reflexión filosófica acerca de la economía no ha dejado de aumentar conforme esta disciplina se ha venido coronando, gradualmente a lo largo del pasado siglo, como la reina de las ciencias sociales. Al contrario de lo que ocurre en el resto de ciencias sociales, en economía impera un paradigma central: la visión neoclásica. Esta explica el valor de los bienes a partir de la psicología de los consumidores (supone que existe una racionalidad individual) y pone el énfasis en los equilibrios de mercado, entendidos como las soluciones estables que resultan cuando el conjunto de agentes actúa de forma que cada uno maximiza su utilidad individual. Aunque hay una pluralidad de formas de aplicar el pensamiento neoclásico, los enfoques alternativos, como la economía de inspiración marxista, suelen ser muy secundarios.

Además de reinar un paradigma dominante, en economía existe un claro consenso acerca de qué herramientas analíticas y problemas constituyen el corpus ortodoxo de la disciplina y cuáles no. Y su lenguaje, altamente matematizado, ha ido expandiéndose y ejerciendo una creciente influencia en otras áreas científico sociales e incluso en algunas menos afines, como la biología (pensemos en la teoría evolutiva de los juegos, que es la aplicación de la teoría de los juegos a la biología). A esta expansión progresiva se han referido algunos mediante la noción de «imperialismo económico», y continúa abierto el debate acerca de si se trata de un fenómeno deseable o si, por el contrario, perjudica el estatus científico de las ciencias sociales al limitar su diversidad.







Las razones de este imperialismo pueden ser internas o externas a la ciencia; es decir, pueden estar basadas en las ventajas epistémicas del método económico o bien en factores sociales o institucionales. De cualquier manera, son muchos los que vieron amenazada la situación privilegiada de la economía a partir de la gran crisis financiera originada en 2008. Para algunos, incluidos varios premios nóbel de economía, los eventos asociados a la Gran Recesión pusieron de manifiesto la incapacidad de los economistas para predecir y evitar las crisis. Los economistas y filósofos que ya denunciaban la excesiva formalización de unos modelos teóricos basados en supuestos poco realistas (como la racionalidad de los agentes económicos) vieron en esta crisis una confirmación de sus críticas al paradigma económico dominante.

Quizás una de las objeciones más punzantes de entre las emitidas por economistas célebres ha sido la de Paul Krugman: «La economía, en su conjunto, se ha extraviado porque los economistas, como grupo, han confundido la belleza, revestida de un flamante aparato matemático, con la verdad». Según esta visión, la sofisticación formal de la economía se convirtió en un fin en sí mismo, y los modelos teóricos no han servido ni para predecir los problemas que se avecinaban ni para

proporcionar consejos prácticos que los solventaran.

En realidad, la crisis de 2008 solo aportaba nuevos bríos al debate metodológico por excelencia, que mantienen tanto los propios economistas como los filósofos interesados en la economía: la discusión en torno al realismo de los modelos económicos.

En 1953, Milton Friedman escribió su célebre ensayo «La metodología de la economía positiva», donde proporcionaba una línea clásica de defensa ante los que criticaban las teorías económicas por su falta de realismo. Friedman defiende que las teorías o hipótesis económicas no deben ser evaluadas por su realismo o ajuste descriptivo, sino por su relevancia o significado. Las mejores teorías son las que dan lugar a más y mejores predicciones con los supuestos más sencillos; es decir, las que consiguen ser, al tiempo, más simples y más fructíferas. Según esta perspectiva, que una teoría describa de forma realista un fenómeno es a veces más una rémora que una ventaja epistemológica: una teoría rica en detalles será compleja y difícil de manejar, aplicable a menos casos y, por tanto, menos general.

Para Friedman, un modelo que contenga, por ejemplo, el supuesto de que los empresarios intentan maximizar sus beneficios igualando sus precios a los costes marginales de producción no queda en entredicho por el hecho que los empresarios no se comporten así. De hecho, puede suceder que elijan los precios en función de los costes medios (en lugar de los marginales). Para que sea un buen modelo, basta con que los agentes se comporten *como si* estuvieran intentando maximizar sus beneficios. Es decir, basta con que las predicciones de la misma se cumplan.

La visión de Friedman ha sido muy influyente entre los economistas, que, desde el principio y de modo mayoritario, se han acogido a esta doctrina metodológica para defenderse de sus críticos. En cambio, ha recibido reveses por parte de los metodólogos profesionales. En primer lugar, por su eclecticismo, que la hace difícilmente clasificable (no encaja en ninguna doctrina filosófico-científica). En segundo lugar, por su relación con la práctica científica de los economistas: la mayor parte de estos son, de facto, realistas acerca de los principales supuestos de sus teorías, y tienden a entender que sus modelos simplemente idealizan o estilizan los hechos económicos reales. Finalmente, porque el éxito predictivo de la economía no es, precisamente, su punto fuerte. No obstante, el tipo de antirrealismo inherente a la visión friedmaniana del «como si», de corte ficcionalista, ha recibido en los últimos años un respaldo indirecto desde la filosofía de la ciencia, pues han surgido una serie de interesantes trabajos que tratan de conectar las prácticas representacionales del arte y de la ficción con las que se observan en los modelos científicos. Pensemos, por ejemplo, en cómo la ficción literaria tiene que seguir una serie de reglas de verosimilitud y consistencia para representar de forma exitosa una historia.

Con todo, si los modelos teóricos han desempeñado un papel tan central es, en parte, porque ya desde sus inicios como disciplina científica autónoma, la economía se ha asociado con la imposibilidad de llevar a cabo experimentos. No podemos intervenir en las variables macroeconómicas de forma controlada para observar los efectos que tiene nuestra intervención. Sin embargo, y sobre todo a partir de los años setenta y ochenta del siglo xx, un conjunto de economistas y psicólogos sociales ha venido desarrollando una rama de la economía cada vez más importante cuyo eje es, justamente, el método experimental. Se trata de dos programas de investigación que surgieron de forma independiente y que gradualmente han ido estableciendo vínculos entre sí. Hablamos de la economía experimental y la economía del comportamiento. En 2002, ambas fueron premiadas con un nóbel de economía, otorgado *ex aequo* a Vernon Smith y a Daniel Kahneman.

Si bien tanto Smith como Kahneman, se han ocupado en sus trabajos de lo que conocemos como microeconomía, o comportamiento económico de los individuos, sus respectivos programas de investigación han arrojado luz sobre la macroeconomía gracias a los experimentos de laboratorio. Los estudios de Smith han aportado pistas sobre el funcionamiento de los mercados, los de Kahneman, sobre los resultados no esperados de las decisiones individuales o de la interacción entre agentes económicos racionales.

Los experimentos de Smith se han centrado, en una primera etapa, en los mecanismos responsables de la eficiencia de los mercados. Mediante la recreación de mercados artificiales integrados por agentes de carne y hueso (en su mayoría estudiantes), demostró que los precios tienden a converger hacia el equilibrio. Sus diseños experimentales han sido después utilizados por diversas instituciones gubernamentales para desarrollar mercados regulados en sectores estratégicos, como el eléctrico. En una etapa posterior, Smith y otros colaboradores se embarcaron en el estudio de fenómenos de irracionalidad colectiva, recreando en el laboratorio el surgimiento de burbujas y colapsos financieros.

Por su parte, Kahneman y otros estudiosos de la economía del comportamiento han investigado fenómenos de irracionalidad económica, como la aversión a la pérdida. Junto a Amos Tversky, ha desarrollado la teoría prospectiva, que describe cómo los agentes deciden en situaciones de riesgo o incertidumbre, y el modo en que el marco de decisión ejerce un impacto en la evaluación de las ganancias y pérdidas potenciales.

Ambas disciplinas (la economía experimental y la del comportamiento), unidas ahora en un corpus común, constituyen una de las áreas emergentes en economía. Pero, además, constituyen una nueva fuente de problemas y rompecabezas para los filósofos, y no solo por sus hallazgos sustantivos, sino también por las preguntas que suscita la aplicación de los métodos experimentales en estudios con sujetos racionales. Podemos dejar planteada una de ellas: ¿qué implicaciones tiene el juego de expectativas mutuas e interacciones estratégicas que surgen entre quien participa en un experimento económico y el propio experimentador? IyC

PARA SABER MÁS

The inexact and separate science of economics. Daniel M. Hausman. Cambridge University Press, 1992.
The methodology of experimental economics. Francesco Guala. Cambridge University Press, 2005.
Sobre la economía y sus métodos. Juan García-Bermejo Ochoa. CSIC, 2009.
The Oxford handbook of philosophy of economics. Harold Kincaid y Don Ross. Oxford University Press, 2009.
The philosophy of economics. Julian Reiss. Routledge, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Psicología de las preferencias. Daniel Kahneman y Amos Tversky en *IyC*, marzo de 1982.
Las bases de la teoría económica. Bernard Guerrien en *IyC*, septiembre de 1992.
Ciencia económica. Final de siglo. Francisco Bustelo en *IyC*, abril de 1999.

por Amaya Moro Martín



Amaya Moro Martín es astrofísica en el Instituto para la Ciencia del Telescopio Espacial en Baltimore, Maryland. (Las opiniones expresadas son las de la autora y no las de su empleador.)

La fuga de cerebros, tergiversada

El Gobierno español considera diplomáticos a los científicos que vivimos exiliados

Nunca me he considerado una diplomática, así que me llevé una sorpresa cuando, hace poco, el Gobierno español me etiquetó como tal. Antes, los emigrantes científicos como yo, obligados a marcharnos de España a causa de las penosas circunstancias de la investigación en nuestro país, oficialmente no existíamos. Se decía que éramos una «leyenda urbana». Ahora me entero de que no solo soy real, sino que, además, formo parte de una deliberada e ingeniosa estrategia del Gobierno consistente en enviar científicos al extranjero para afianzar la colaboración internacional y fortalecer, no debilitar, la ciencia española.

Esta «posverdad» se presenta en un artículo publicado el pasado febrero en la revista *Science & Diplomacy*. En él se explica que el Gobierno español recluta a científicos emigrantes «para que sirvan de aliados fundamentales». Mientras países como EE.UU. recortan gastos en diplomacia científica, España alardea sobre cómo los investigadores que han tenido que salir al extranjero forman ahora parte de su campaña para «consolidar su presencia científica en países estratégicos».

Pensaba que estaba presenciando una fuga de cerebros al ver a los científicos españoles, indignados y desesperados, abandonar nuestro país. Sin embargo, según los funcionarios del Gobierno, ese flujo unidireccional de talentos forma parte de una «circulación de cerebros» con repercusiones positivas para todos. Esos científicos se han desarraigado y han dejado a sus familias como consecuencia de unos graves y nefastos recortes en la capacidad investigadora del país. Presentar, engañosamente, su decisión como parte de una estrategia deliberada de España para «reforzar su diplomacia científica» en el extranjero es insultante y cruel.

La fuga de cerebros que el Gobierno trata de ocultar afecta a todos los científicos. Los recortes en inversión pública han restringido las oportunidades de obtener becas y empleo y han dejado a las instituciones al borde de la quiebra. Es difícil estimar cuántos científicos han abandonado el país, pero, según el Instituto Nacional de Estadística, entre 2010 (cuando comenzaron los recortes) y 2013 se perdieron 11.000 personas dedicadas a la investigación.

Y la tergiversación va más allá. Según el artículo, España está estratégicamente «integrando las prioridades del plan nacional de investigación, desarrollo e innovación (I+D+I) en la política exterior española» para poderse «aprovechar del talento nacional, allí donde esté, y explorar fórmulas flexibles para permitir que el conocimiento resultante beneficie al país».



En otras palabras, los políticos españoles tratan de atribuirse el mérito de la ciencia realizada y financiada en el extranjero, y la proclaman «Made in Spain».

El artículo también afirma que «España necesita promover una cultura científica en la política pública dentro de los poderes legislativo y ejecutivo». Y como primer paso, menciona su iniciativa para incluir «científicos en misiones diplomáticas», como en Londres y Berlín. España carece de un consejo científico asesor de alto nivel políticamente independiente (exigido desde hace tiempo por la comunidad científica). Es absurdo que lo mejor que pueda ofrecer el Gobierno consista en colocar asesores científicos en embajadas, lejos del centro de toma de decisiones en Madrid. Así que existe cierta verdad subyacente en el artículo de *Science & Diplomacy*: a este paso, la ciencia española podría terminar convirtiéndose en una cuestión únicamente tratada en el marco de la política exterior.

La posverdad en la política científica española no se limita a la fuga de cerebros. A mediados de febrero, los jóvenes investigadores españoles quedaron consternados al ver que las condiciones de sus contratos cambiaron de forma retroactiva hasta el año 2013. Oficialmente, dejaban de prestar un servicio de investigación (una concesión que a duras penas se consiguió incluir en la legislación en 2011 y que ofrecía más beneficios). Se trata de los contratos más comunes en el nivel inicial y hay unos 10.000 investigadores afectados. El cambio implicaba que sus actividades investigadoras no se clasificaban como trabajo; además, se consideraba que sus antiguos contratos nunca existieron. El Gobierno afirmaba que los científicos no se verían perjudicados. Los expertos en asuntos laborales discrepaban. El Gobierno finalmente se ha retractado.

Pero dejemos a un lado las posverdades. La realidad es que el contexto de la investigación en España es preocupante. En marzo presenciamos el desmantelamiento de Abengoa Research, el buque insignia del sector privado español en I+D, el mayor laboratorio nacional en investigación básica de energías renovables y líder mundial en el campo. Su cierre es sintomático: la inversión pública en I+D atrae la privada, y esta no florece si la primera se marchita.

Los investigadores españoles deben encontrar de nuevo su voz. Deben exigir de sus políticos iniciativas sólidas, respaldadas por una financiación continuada, que hagan frente urgentemente al estado crítico de la ciencia en España. El momento de ser diplomáticos hace tiempo que pasó.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 543, pág. 289, 2017. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de nature



INTELIGENCIA ARTIFICIAL

¿SOY HUMANO?



LOS INVESTIGADORES NECESITAN NUEVOS MÉTODOS PARA DISTINGUIR LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL DE LA NATURAL

Gary Marcus

ZOHAR LAZAR *(ilustraciones)*; GETTY IMAGES *(huella digital)*

>>En 1950 Alan Turing concibió un experimento mental al que desde entonces se ha venerado como la prueba de fuego de la inteligencia artificial. El matemático lo denominó «juego de la imitación», pero la mayoría lo conoce como test de Turing. Anticipando lo que ahora llamamos *chatbots* (programas informáticos que aparentan ser humanos mediante su interacción verbal con los usuarios), Turing imaginó un concurso en el cual una máquina respondería a preguntas sobre poesía y cometería deliberadamente errores aritméticos en un intento de inducir al interrogador a pensar que hablaba con una persona. Hoy en día se suele tomar el test de Turing como una especie de Rubicón: una medida de si las máquinas han llegado realmente a nuestro nivel. Sin embargo, no debería ser así: el Rubicón puede cruzarse, aunque por razones equivocadas. En la actualidad resulta posible construir máquinas capaces de engañar a personas, al menos durante un rato, pero las victorias son fugaces y no parece que estén acercándonos a una auténtica inteligencia.



Gary Marcus es director del Laboratorio de Inteligencia Artificial de Uber y profesor de psicología y neurociencias en la Universidad de Nueva York. Su libro más reciente, coeditado con Jeremy Freeman, es *The future of the brain* (Princeton University Press, 2014).

El problema radica en que el test de Turing puede manipularse con demasiada facilidad. Para «vencer» basta con engañar o fingir ignorancia. Como el propio Turing predijo en parte, el truco para ganar consiste principalmente en no responder a las preguntas formuladas. Si un juez preguntara «¿Tienes sentimientos?», la máquina tendría que mentir para no perder. Pero este extraño giro no representa una excepción, sino la norma. La manera de superar el test de Turing es mediante el engaño.

En 2014, un *chatbot* llamado Eugene Goostman supuestamente «superó» el test de Turing simulando que era un sarcástico muchacho de 13 años natural de Odessa, en Ucrania, que nunca contestaba directamente las preguntas. Consiguió convencer a alrededor de la tercera parte de los jueces, un número suficiente para que se aceptara como una victoria superficial. Pero ¿importa? Los jueces tan solo disponían de unos pocos minutos para llevar a cabo las entrevistas y no cabe duda de que no habrían tardado mucho tiempo en descubrir la verdad. En realidad, Eugene no sabía —ni entendía— casi nada. Véase el siguiente diálogo que el científico computacional Scott Aaronson mantuvo con él:

SCOTT: *¿Qué es más grande, una caja de zapatos o el monte Everest?*
>> **EUGENE:** *Ahora mismo soy incapaz de decidirme. Tendré que meditarlo más tarde. Y se me ha olvidado preguntarte de dónde eres.*
SCOTT: *¿Cuántas patas tiene un camello?*
>> **EUGENE:** *Entre 2 y 4. ¿Podrían ser tres? :-))) Por cierto, todavía no sé cuál es tu especialidad... O a lo mejor es que no me he enterado.*
SCOTT: *¿Cuántas patas tiene un milpiés?*
>> **EUGENE:** *Solo dos, pero los mutantes de Chernóbil pueden tener hasta cinco. Sé que tendrías que intentar engañarme.*
SCOTT: *No, tengo que averiguar si eres un* chatbot *o no. Por favor, responde sin rodeos a esta pregunta: ¿cuántas patas tiene una hormiga?*
>> **EUGENE:** *Entre 2 y 4. ¿Podrían ser tres? :-))) Esta sí que es una conversación fructífera ;-).*

Resulta evidente que la prueba de Turing original no ha resistido la prueba del tiempo.

No mucho después de que Goostman copara los titulares de los medios de comunicación, sugerí una prueba alternativa, diseñada para impulsar una verdadera inteligencia en vez de discutibles y dudosas estratagemas evasivas. En un artículo que publiqué en el blog de la revista

Continúa en la página 61

EN SÍNTESIS

Popularmente, se suele tener al «juego de la imitación» de Alan Turing, en el que una máquina intenta convencer a un interrogador de que es una persona, como la prueba de fuego de la inteligencia artificial.

Sin embargo, el test de Turing no ha envejecido bien. Superarlo es más una cuestión de saber engañar que de verdadera inteligencia. Los expertos sostienen que ha llegado la hora de sustituir el test de Turing por una batería de pruebas que evalúe la inteligencia de una máquina desde múltiples y diversas perspectivas.

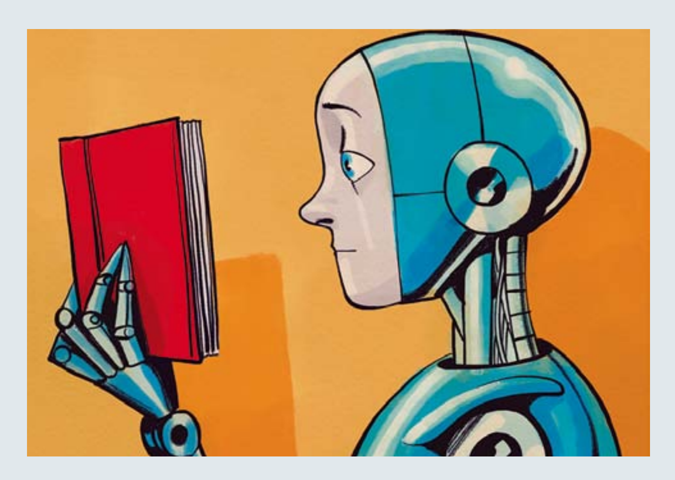
Una máquina verdaderamente inteligente debería ser capaz, entre otras cosas, de entender oraciones ambiguas, ensamblar las piezas de un mueble y aprobar un examen de ciencias de primaria. La dificultad de estas tareas subraya el hecho de que, a pesar de todo el bombo publicitario, la inteligencia artificial de nivel humano no se alcanzará en un futuro próximo.

LOS NUEVOS TESTS DE TURING

Los expertos en inteligencia artificial están desarrollando diversas pruebas para sustituir al «juego de la imitación» que Alan Turing ideó hace 67 años. A continuación se presentan cuatro posibilidades.

John Pavlus

TEST 01



El reto de los esquemas de Winograd

Llamado así en honor al pionero de la inteligencia artificial Terry Winograd, un «esquema de Winograd» consiste básicamente en una pregunta en lenguaje natural, sencilla pero formulada con ambigüedad. Responder de forma correcta requiere un entendimiento «de sentido común» sobre cómo los agentes, los objetos y las normas culturales se influyen mutuamente en el mundo real.

El primer esquema de Winograd, formulado por este en 1971, describe una situación («Los concejales denegaron el permiso a los manifestantes porque temían la violencia») y luego plantea una pregunta sobre ella («¿Quiénes temían la violencia?»). Se trata de lo que se conoce como un problema de desambiguación del pronombre (PDP; en este caso, del «ellos» implícito en la subordinada). Pero los esquemas de Winograd son más sutiles que la mayoría de los PDP, ya que el referente del pronombre puede cambiarse modificando una sola palabra; por ejemplo: «Los concejales denegaron el permiso a los manifestantes porque defendían la violencia». En general, la gente usará su «sentido común» o su «conocimiento del mundo» acerca de las relaciones típicas entre concejales y manifestantes para resolver el problema.

El reto comienza con una ronda preliminar de PDP para excluir a los sistemas menos inteligentes; aquellos que pasan el corte se enfrentan a verdaderos esquemas de Winograd.

PROS: Dado que los ordenadores carecen de un acceso fiable al conocimiento sociocultural en el que se basan los esquemas de Winograd, el reto se caracteriza por una robustez «a prueba de Google»; es decir, es difícil superarlo haciendo búsquedas en Internet.

CONTRAS: La reserva de esquemas utilizables es relativamente escasa. «No son fáciles de encontrar», dice Ernest Davis, profesor de ciencias de la computación de la Universidad de Nueva York.

NIVEL DE DIFICULTAD: Alto. En 2016, cuatro sistemas participaron en una competición en la cual debían responder a un conjunto de 60 esquemas de Winograd. El ganador acertó tan solo el 58 por ciento de las preguntas, un valor muy por debajo del umbral del 90 por ciento que los investigadores exigen para dar por superado el reto.

UTILIDAD: Distinguir entre comprensión e imitación. «Siri [el asistente digital de Apple] no entiende los pronombres, así que es incapaz de desambiguarlos», explica Leora Morgenstern, investigadora de la compañía Leidos que trabajó con Davis en el reto de los esquemas de Winograd. Ello implica que «en realidad no se puede mantener un diálogo [con el sistema], porque siempre haremos referencias a algo mencionado previamente en la conversación».

TEST



Exámenes normalizados para máquinas

En este caso, la inteligencia artificial se sometería sin más apoyo a los mismos tests estandarizados que han de efectuar los alumnos de primaria y secundaria en algunos sistemas educativos. El método evaluaría la capacidad de una máquina para relacionar hechos de manera novedosa mediante la comprensión semántica.

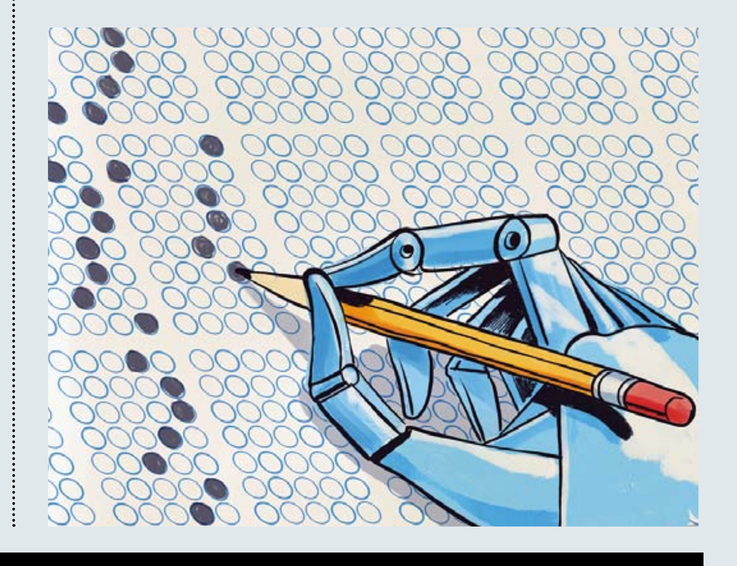
Al igual que el juego de imitación original de Turing, se trata de una idea ingeniosamente directa. Basta con seleccionar un test normalizado lo bastante riguroso (por ejemplo, los apartados de opción múltiple de los exámenes de ciencias de cuarto de primaria del estado de Nueva York) y equipar a la máquina con medios para captar el contenido de la prueba (sistemas de visión artificial y de procesamiento del lenguaje natural).

PROS: Variado y pragmático. A diferencia del reto de los esquemas de Winograd, los materiales para los exámenes normalizados son baratos y abundantes. Y puesto que no se adaptan ni se preprocesan en beneficio de la máquina, se requiere un gran conocimiento del mundo, variado y de sentido común, solo ya para analizar las preguntas de la prueba, por no hablar de proporcionar las respuestas correctas.

CONTRAS: No son tan seguros contra Google como los esquemas de Winograd y, al igual que ocurre con los seres humanos, la aptitud para aprobar un examen normalizado no implica necesariamente una inteligencia «real».

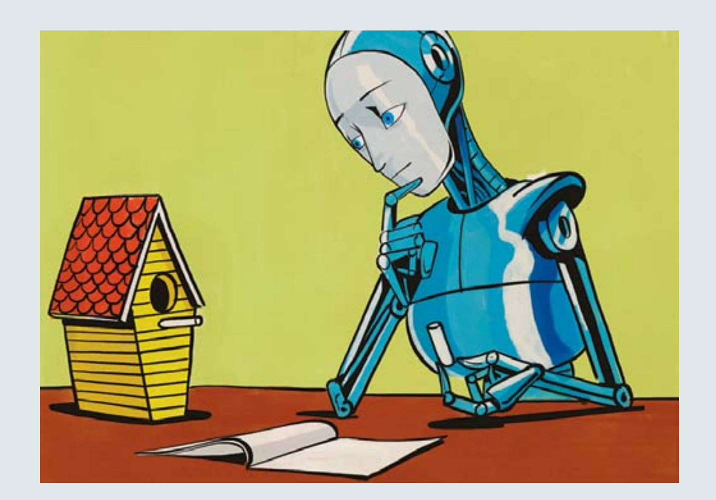
NIVEL DE DIFICULTAD: Moderadamente alto. Un sistema llamado Aristo, diseñado por el Instituto Allen de Inteligencia Artificial, obtuvo una puntuación media sin precedentes de 75 sobre 100 en exámenes de ciencias de primaria. Pero estos constaban tan solo de preguntas de opción múltiple sin diagramas. «Hasta la fecha, ningún sistema ha aprobado ni por asomo un examen completo de ciencias de cuarto de primaria», escribieron los investigadores del Instituto Allen en un artículo publicado en *AI Magazine*.

UTILIDAD: Ayudar a poner los pies en la tierra. «Lo que vemos es que ningún programa obtiene más de un 60 por ciento en un examen de ciencias de secundaria. Pero, al mismo tiempo, podemos leer la noticia de que el ordenador Watson de IBM va a la facultad de medicina y ayuda a tratar el cáncer», dice Oren Etzioni, director ejecutivo del Instituto Allen de Inteligencia Artificial. «O IBM ha logrado un asombroso avance, o quizás estén exagerando un poco.»



TEST 03





Test de Turing corporeizado

La mayoría de las pruebas de inteligencia artificial se centran en la cognición, pero este test se parece más a una clase de manualidades: una inteligencia artificial ha de manipular, físicamente y con sentido, objetos del mundo real.

La prueba se compondría de dos tramos. En el de construcción, una inteligencia artificial corporeizada (un robot) intentaría levantar una estructura a partir de un montón de piezas siguiendo instrucciones verbales, escritas o dibujadas (piense en montar un mueble de IKEA). El tramo de exploración requeriría que el robot idease soluciones a un conjunto de desafíos, de creatividad creciente y ampliables de modo indefinido, usando bloques de juguete (por ejemplo, construir un muro, construir una casa, adosar un garaje a la casa). Cada tramo culminaría en un desafío de comunicación en el cual se le exigiría al robot que «explicara» su trabajo. El test podría aplicarse a robots individuales o a grupos de ellos, con o sin colaboración humana.

PROS: El test integra aspectos prácticos de la inteligencia (en concreto, la percepción y la acción) que históricamente se han pasado por alto o no se han investigado lo suficiente. Además, es casi imposible hacer trampas: «No sé cómo podría manipularse, a menos que se averiguara un modo de subir a Internet las instrucciones para construir cualquier cosa que alguna vez se haya construido», señala Charles Ortiz, de Nuance.

CONTRAS: Aparatoso, tedioso y difícil de automatizar salvo que las máquinas lo realizaran en un entorno de realidad virtual. Incluso así, «un experto en robótica alegaría que [la realidad virtual] no deja de ser una aproximación», explica Ortiz. «En el mundo real, al levantar un objeto se corre el riesgo de que se le resbale a uno de las manos, o puede soplar la brisa. Resulta difícil recrear todos estos matices en un mundo virtual.»

NIVEL DE DIFICULTAD: De ciencia ficción. Una inteligencia artificial corporeizada que pudiera manipular objetos de manera competente y explicar con coherencia sus acciones se comportaría básicamente como un androide de *La guerra de las galaxias*, algo que se halla muy lejos del alcance de la tecnología actual. «Ejecutar estas tareas como las hacen los niños, para quienes son rutinarias, presenta una dificultad tremenda», admite Ortiz.

UTILIDAD: Imaginar una ruta que integre las cuatro facetas de la inteligencia artificial (percepción, acción, cognición y lenguaje), las cuales suelen considerarse por separado en los programas de investigación especializados.

I-atlón

En una batería de pruebas parcial o totalmente automatizadas, se le pide a una máquina que, entre otras tareas, resuma el contenido de un archivo de audio, narre el argumento de un vídeo y traduzca lenguaje natural sobre la marcha. El objetivo consiste en crear un método objetivo para medir la inteligencia. La automatización de las pruebas y de la puntuación (sin supervisión humana) es el sello distintivo de esta idea. Eliminar cualquier intervención humana en el proceso de evaluación de la inteligencia de la máquina puede parecer paradójico, pero Murray Campbell, investigador en inteligencia artificial de IBM y miembro del equipo que desarrolló Deep Blue, asegura que es necesario para garantizar la eficiencia y la reproducibilidad. Además, si la inteligencia de un sistema artificial se determinase mediante algoritmos, los investigadores no se verían obligados a tomar como vara de medir la inteligencia humana («con todos sus sesgos cognitivos», como dice Campbell).

PROS: Objetividad, al menos en teoría. Una vez que los jueces del I-atlón decidieran cómo puntuar cada prueba y cómo ponderar los resultados, los ordenadores llevarían a cabo la evaluación. Juzgar los resultados debería ser tan inequívoco como la *foto finish* de una carrera olímpica. La variedad de pruebas también ayudaría a identificar lo que los investigadores de IBM denominan «sistemas inteligentes en sentido amplio».

CONTRAS: Potencialmente inescrutable. Los algoritmos de I-atlón podrían otorgar calificaciones altas a sistemas de inteligencia artificial que actuasen de una manera que los investigadores no llegaran a entender del todo. «Cabe la posibilidad de que algunas decisiones que tomasen los sistemas avanzados de inteligencia artificial resultaran difíciles de explicar [a los seres humanos] de forma concisa y comprensible», admite Campbell. Este problema, llamado «de la caja negra», está adquiriendo importancia para los investigadores que trabajan con redes neuronales convolucionales.

NIVEL DE DIFICULTAD: Depende. Los sistemas actuales podrían desempeñar bien varias pruebas potenciales de I-atlón, como las relacionadas con el reconocimiento de imágenes o la traducción de idiomas. Otras, como explicar el contenido de un vídeo o dibujar un diagrama a partir de una descripción verbal, aún pertenecen al reino de la ciencia ficción.

UTILIDAD: Reducir el impacto de los sesgos cognitivos humanos sobre la medición de la inteligencia de la máquina y cuantificar —no solo identificar— el rendimiento.



John Pavlus es escritor especializado en ciencia y tecnología.

Viene de la página 58
New Yorker, propuse que se desechara el test de Turing en beneficio de una prueba de comprensión más robusta, un «test de Turing para el siglo xxi».

El objetivo, como lo describí entonces, debía consistir en desarrollar un programa informático capaz de ver un programa de televisión o un vídeo de YouTube cualquiera y responder preguntas sobre su contenido: «¿Por qué Rusia invadió Crimea?» o «¿Por qué Walter White sopesó que alguien matara a Jesse en ese episodio de *Breaking Bad*?». La idea iba dirigida a eliminar las artimañas y centrarse en si las máquinas pueden entender de verdad los contenidos a los que se les expone. Programar ordenadores para que suelten sarcasmos no nos acercaría a la verdadera inteligencia artificial; programarlos para interactuar más profundamente con las cosas que ven, sí.

Francesca Rossi, por entonces presidenta de la Conferencia Conjunta Internacional sobre Inteligencia Artificial, leyó mi propuesta y sugirió que trabajásemos juntos para hacer realidad esa versión actualizada del test de Turing. Reclutamos a Manuela Veloso, experta en robótica de la Universidad Carnegie Mellon y expresidenta de la Asociación para el Avance de la Inteligencia Artificial, y los tres empezamos a devanarnos los sesos. Al principio nos propusimos encontrar un único test que pudiera reemplazar al de Turing, pero enseguida volcamos nuestro interés en la idea de plantear múltiples retos, pues del mismo modo que no hay una única prueba de destreza atlética, tampoco sería suficiente con un único test de inteligencia.

También decidimos implicar a la comunidad de expertos en inteligencia artificial. En enero de 2015 reunimos a unos 50 destacados investigadores en Austin, Texas, para hablar de la reinvención del test de Turing. A lo largo de un día entero de presentaciones y debates, convinimos en la idoneidad de una competición con múltiples modalidades.

La primera de ellas, el «reto de los esquemas de Winograd», llamado así por el pionero de la inteligencia artificial Terry Winograd (y mentor de Larry Page y Sergey Brin, los creadores de Google), sometería a las máquinas a un test en el que concurren la comprensión del lenguaje y el sentido común. Cualquiera que haya intentado alguna vez programar una máquina para que entienda el lenguaje natural se habrá percatado rápidamente de que en la práctica casi todas las oraciones son ambiguas, a menudo en muchos aspectos. Nuestro cerebro es tan hábil en entender el lenguaje que por lo general no lo advertimos. Considere la siguiente frase: «La bola grande hizo añicos la mesa porque estaba hecha de poliestireno». Estrictamente hablando, surge una ambigüedad: tanto «la mesa» como «la bola» podrían actuar como sujeto de la segunda oración. Cualquier oyente humano se dará cuenta de que «estaba hecha de poliestireno» se refiere a la mesa, pero eso requiere relacionar conocimientos sobre materiales con la comprensión del lenguaje, algo que aún se halla lejos del alcance de las máquinas. Tres expertos, Hector Levesque, Ernest Davis y Leora Morgenstern, ya han desarrollado un test basado en oraciones de este tipo, y una empresa de reconocimiento del habla, Nuance Communications, ha ofrecido un premio de 25.000 dólares al primer sistema que lo supere.

Albergamos la esperanza de incluir muchas más pruebas. Sería natural incorporar un test de comprensión que evaluase la capacidad de las máquinas para entender imágenes, vídeos, audio y texto. Charles Ortiz hijo, director del Laboratorio de Inteligencia Artificial y Procesamiento del Lenguaje Natural de Nuance, propuso un «reto de construcción»: uno que mediría la percepción y la acción física, dos importantes elementos del comportamiento inteligente que el test de Turing original obviaba por completo. Y Peter Clark, del Instituto Allen de Inteligencia Artificial, propuso someter a las máquinas a los mismos exámenes estandarizados de ciencias y otras disciplinas que hacen los niños en la escuela.

Aparte de las pruebas en sí, los asistentes hablaron de qué pautas determinan un buen test. Guruduth Banavar y sus colegas de IBM, por ejemplo, recalcaron que las pruebas mismas deberían generarse por ordenador. Stuart Shieber, de Harvard, puso énfasis en la transparencia: para que los torneos hiciesen avanzar la disciplina, los premios deberían otorgarse únicamente a sistemas que fuesen reproducibles y abiertos; es decir, que estuviesen a disposición de toda la comunidad de inteligencia artificial.

¿Cuándo conseguirán las máquinas estar a la altura de los desafíos que hemos acordado? Nadie lo sabe. Pero algunas pruebas ya empiezan a ser tomadas en serio, y eso podría ser importante para el mundo. Un robot que llegue a dominar el reto de la construcción podría, entre otras cosas, levantar campamentos temporales para personas desplazadas, ya fuese en la Tierra o en planetas lejanos. Una máquina que supere el reto de los esquemas de Winograd y un examen de biología de primaria, por ejemplo, nos acercaría al sueño de disponer de sistemas capaces de integrar la extensa bibliografía sobre medicina humana, lo que quizá constituiría un primer paso vital para curar el cáncer o descifrar el cerebro humano. La inteligencia artificial, como todas las disciplinas, necesita objetivos claros. El test de Turing supuso un buen comienzo; ahora es el momento de diseñar una nueva generación de retos. IyC

> **Así como no hay una única prueba de destreza atlética, tampoco sería suficiente un único test de inteligencia**

PARA SABER MÁS

Computing machinery and intelligence. Alan M. Turing en *Mind*, vol. 59, n.º 235, págs. 433-460, octubre de 1950.
What comes after the Turing test? Gary Marcus en *New Yorker*, 9 de junio de 2014. Disponible en: **www.newyorker.com/tech/elements/what-comes-after-the-turing-test**
Beyond the Turing test. Número especial de *AI Magazine*, vol. 37, n.º 1, 2016.
The Winograd Schema Challenge: **commonsensereasoning.org/winograd.html**

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Podría pensar una máquina? Paul M. Churchland y Patricia Smith Churchland en *IyC*, marzo de 1990.
¿Es la mente un programa informático? John R. Searle en *IyC*, marzo de 1990.
¿Máquinas pensantes? María Cerezo en *IyC*, septiembre de 2014.
La fórmula de la inteligencia. Jean-Paul Delahaye en *MyC* n.º 84, 2017.

AGRICULTURA

LA DIABRÓTICA, LA PLAGA QUE ASOLA LOS MAIZALES

Los expertos temen que las nuevas técnicas de ingeniería genética destinadas a combatir el insecto pierdan pronto su eficacia

Hannah Nordhaus



FOTOGRAFÍAS DE PATRICK CAVAN BROWN



A LA CAZA DE INSECTOS: Encaramado a un andamio de 10 metros sobre un maizal de Illinois, un investigador busca especímenes de diabrótica occidental (*recuadro*), una plaga que arruina cosechas enteras de este cereal.

Hannah Nordhaus es periodista y escribe sobre ciencia, historia y el mundo natural.





A PESAR DE SU NOMBRE, NO HAY NADA EN PIPER CITY QUE EVOQUE UNA CIUDAD.

Este pueblo del estado de Illinois luce una silueta jalonada por altos silos de grano, un minúsculo entramado de casas con techos a dos aguas y, en pocas manzanas, campos que se pierden hasta el horizonte: maíz, soja, maíz, soja, maíz, maíz y, de nuevo, maíz, perfectamente nivelados y cuadriculados, sin árboles, ni ganado, ni setos, ni terrenos en baldío. A finales de agosto de 2013, Joseph Spencer condujo por una carretera local flanqueada por maizales al noroeste de Piper City hasta que su GPS le indicó que girara para enfilar un camino de grava. Entomólogo especialista en insectos agrícolas, iba en busca de un agricultor llamado Scott Wyllie.

En los años de bonanza, el maíz que crece en torno a Piper City y en otros lugares es tan uniforme y predecible como cualquier artefacto salido de una cadena de montaje: las plantas crecen equidistantes hasta alcanzar idéntica altura. El maíz de Wyllie, en cambio, parecía haber adquirido personalidad propia. Los tallos se habían retorcido como el cuello de un cisne. Se podían arrancar del suelo con un tirón de mano; las raíces blancas estaban roídas y parduscas, como los dientes cariados. Los ápices de algunas plantas se habían doblado por su propio peso. Y en el aire pululaba una nube de escarabajos negriamarillos, del tamaño de granos. Amontonados sobre las hojas, se apareaban y defecaban en ellas mientras devoraban las barbas (los estigmas de la planta). Spencer tuvo que cerrar la boca para no tragar ninguno.

Los escarabajos pertenecían a la especie denominada diabrótica occidental del maíz, y sus larvas habían devorado las raíces del cereal de Wyllie hasta matarlo. Este productor, que cultiva 400 hectáreas, le dijo que había seguido todos los consejos preceptivos para combatir la plaga: había rotado el cultivo del maíz con el de soja en años alternos para dejar sin alimento a las larvas y había sembrado semillas de una variedad genéticamente modificada que segrega una proteína mortífera para las voraces crías. Pero ese día, Spencer pudo contemplar a pie de campo cómo esas estrategias —las más reputadas en la lucha contra la plaga— habían fracasado. Recuerda que un escalofrío le recorrió la espalda y pensó: «Estoy ante la peor situación imaginable». Este especialista ha dedicado la mayor parte de su carrera profesional al estudio del comportamiento de este coleóptero crisomélido en el Instituto de Historia Natural de Illinois (INHS), situado en la universidad de ese estado en Urbana-Champaign. Y era plenamente consciente de que aquel enjambre que revoloteaba a su alrededor podía traer más que problemas, no solo para los cultivos de Wyllie sino para todo el cinturón del maíz del Medio Oeste de Estados Unidos.

La diabrótica occidental (*Diabrotica virgifera virgifera*), también conocida como crisomela del maíz, gusano de la raíz del maíz o alfilerillo, es la plaga más costosa para la agricultura del país. Se la ha apodado *billion-dollar bug* («el bicho de los mil millones de dólares»), aunque en realidad probablemente le cueste a EE.UU.

EN SÍNTESIS

El escarabajo fitófago más costoso para la economía de EE.UU. se las ingenia para burlar los plaguicidas diseñados para proteger el maíz, un cultivo cuyas ventas anuales ascienden a 50.000 millones de dólares solo en ese país.

La última estrategia concebida, creación de Monsanto, consiste en insertar en el cereal moléculas que reconozcan genes específicos de la diabrótica y provoquen su muerte.

Pero los expertos aseguran que el verdadero problema radica en la naturaleza misma de los vastos monocultivos, que brindan a las plagas la oportunidad de adaptarse y sobrevivir.



EL ORIGEN DEL MAL: El entomólogo Joseph Spencer observa diabróticas adultas capturadas en una tienda con mosquiteras con el fin de estudiar su comportamiento (*1*). Las larvas de este escarabajo devoran las raíces del maíz y provocan la pérdida de miles de hectáreas de este valioso cultivo (*2*).



casi el doble de esa suma cada año. El ciclo vital de este escarabajo transcurre en el maíz, que es, de largo, el principal cultivo nacional. A menudo, la superficie cultivada supera los 32 millones de hectáreas, en ocasiones incluso más; el importe anual de las ventas asciende a 50.000 millones de dólares. Los agricultores gastan cientos de millones en productos fitosanitarios, semillas y mano de obra en la lucha contra esta plaga. Y las empresas agrícolas invierten cientos de millones en la creación de productos destinados a ese fin.

El resultado es una carrera armamentista: el escarabajo daña los cultivos; las empresas de semillas crean un producto para acabar con él; este, a su vez, adquiere resistencia frente al producto fitosanitario y el maíz vuelve a enfermar. Hasta que «los buenos de la película llegan al rescate justo a tiempo», empuñando una nueva arma que acaba con la plaga, me cuenta Spencer. Durante la pasada década, el arma predilecta han sido las controvertidas plantas de maíz genomodificadas (modificadas genéticamente), que sintetizan sustancias larvicidas. Pero Spencer presenció cómo en los campos de Wyllie la diabrótica estaba ganando la batalla.

Hoy los agricultores y los científicos depositan sus esperanzas en una nueva modificación: un maíz provisto de moléculas de ARN especiales que actúan en el núcleo de las células del insecto, donde inactivan genes esenciales. El nuevo avance debería llegar a los campos a finales de este decenio. Pero a los ambientalistas les preocupa que las alteraciones génicas puedan ser nocivas para otros insectos beneficiosos, como las mariquitas. Y los expertos y los agricultores saben que solo es cuestión de tiempo que la diabrótica adquiera resistencia contra el nuevo maíz. «No es posible acabar con la resistencia. Solo se puede frenar», asegura Spencer.

CAMBIO DE COMPORTAMIENTO

El despacho que este entomólogo ocupa en el INHS está abarrotado de todo tipo de objetos y chismes cuyo denominador común es el maíz: carteles y pegatinas, jarras, botellas y hasta objetos de plata, que ha ido adquiriendo a través de eBay. Sus colegas lo apodan *Cornboy* («El chico del maíz»). Le entusiasma todo lo relacionado con ese cereal y la diabrótica.

Esta vocación suya nace de la calamidad. En 1987, Eli Levine, otro entomólogo del instituto, recibió la llamada de un ingeniero agrónomo que trabajaba en una de las ensiladoras de grano de Piper City para advertirle que había observado daños en campos donde la siembra de maíz se rotaba con el cultivo de la soja. Hasta ese momento se creía imposible. Puesto que la diabrótica se alimenta en exclusiva de ese cereal y deposita su puesta en él, los agricultores habían podido mantenerlo bajo control alternando su cultivo con el de la leguminosa (cuando las larvas nacían en medio de la soja a la primavera siguiente, estas no tenían nada de que alimentarse). Levine acudió a Piper City en busca de otra explicación: no la halló. «Los escarabajos estaban poniendo los huevos en la soja», explica.

No era la primera vez que la diabrótica había modificado su comportamiento. Cuando el entomólogo John Lawrence LeConte describió por primera vez este escarabajo en Kansas en 1868, era un fitófago inofensivo, originario de Centroamérica y escaso en las Grandes Llanuras del oeste de EE.UU. Con la llegada del verano, los adultos emergían de la tierra, se nutrían de maíz, calabazas y hierbas pratenses, se apareaban, ponían sus huevos en grietas del suelo y morían antes de la primera helada. En primavera, de aquellos huevos nacían diminutas larvas vermiformes blancas que se alimentaban de raíces hasta que afloraban a la superficie.

Solo con la difusión del eficiente riego por aspersión con pivote central a mediados del siglo pasado, que posibilitó el cultivo masivo y continuo del maíz, la diabrótica pudo progresar desde Colorado y Kansas a través de las praderas que habían sido transformadas en maizales. En 1964, cuando alcanzó Illinois, ya era resistente a muchos de los insecticidas con que fumigaban los agricultores. Y un tiempo antes de que Levine visitara Piper City, algunas hembras mutantes hicieron algo insólito: un puñado voló hasta un campo plantado de soja y descubrió que su intestino podía tolerar las hojas de esta leguminosa el tiempo


1

suficiente como para poner los huevos en ellas. Al año siguiente, su descendencia nacería en medio de un festín de maíz. Era una adaptación soberbia. El escarabajo halló así el modo de resistir no solo a los plaguicidas actuales, sino también a las prácticas agrícolas modernas.

En 1996, cuando los productores de Illinois e Indiana ya habían sufrido cuantiosas pérdidas por la acción de estas nuevas diabróticas —la plaga alcanzó tales dimensiones que los limpiaventanas de la Torre Sears de Chicago relataron cómo enormes enjambres de escarabajos arrastrados por el viento iban a parar a sus andamios—, el INHS contrató a Spencer para estudiar el nuevo comportamiento perturbador de la diabrótica. Su tesina de licenciatura había versado sobre la mosca de la cebolla y sus charlas sobre este poco conocido díptero apenas atrajeron el interés de un par de cientos de personas, a lo sumo. En cambio, a su primera charla sobre el coleóptero asistieron más de 1500 agricultores y estudiosos. La muchedumbre permaneció en absoluto silencio prestando gran atención. Se dio cuenta de que el tema preocupaba a la gente.


4

INSECTICIDA ESPECÍFICO

A medida que la plaga de escarabajos resistentes continuó extendiéndose de Illinois a Iowa, Michigan, Missouri, Ohio y Wisconsin, y hasta la vecina Ontario, en Canadá, los agricultores se iban viendo en un serio aprieto. Su sustento dependía de cosechar un maíz vigoroso, por lo que no tuvieron otra alternativa que rociar cada hectárea sembrada con grandes dosis de insecticidas de amplio espectro que resultaban tóxicos. A nadie le gustó el remedio: ni a los agricultores ni a los entomólogos, ni, sobre todo, a la Agencia de Protección Ambiental (EPA).

Por eso, cuando en 2003 el gigante agroquímico Monsanto sacó a la venta una variedad híbrida de maíz que había sido genomodificada para sintetizar una proteína que mataba la diabrótica, los productores de maíz se afanaron en sembrarla en sus campos. La empresa (que sufraga parte de la investigación de Spencer) ya había creado otro híbrido dotado de un gen extraído de una bacteria del suelo, *Bacillus thuringiensis* (Bt), que era tóxico para una polilla, el taladro del maíz europeo (*Ostrinia nubilalis*). El producto demostró tener una extraordinaria eficacia y ese lepidóptero resulta hoy muy escaso. Monsanto usó otra cepa de Bt para diseñar la nueva toxina contra la diabrótica; denominada Cry3Bb1, se fija al intestino de la larva y perfora el epitelio digestivo hasta matarla.

Durante un lustro, los agricultores que sembraron las nuevas semillas larvicidas obtuvieron los mismos resultados provechosos que habían visto con el taladro del maíz. Pero, en 2009, algunos productores de Iowa comenzaron a observar de nuevo daños y no tardó en hacerse patente que algunas diabróticas habían desarrollado resistencia. Los escarabajos del campo de Wyllie, de hecho, demostraron ser inmunes a la rotación de los cultivos y, como mínimo, a dos tipos de toxinas de Bt. Eran, en palabras de Spencer, «las diabróticas más dañinas que había visto». El pasado verano se confirmó la resistencia a una tercera toxina; una cuarta se mantiene en el agro, pero los ensayos de laboratorio indican que ciertas poblaciones también están perdiendo la sensibilidad a ella.

Puesto que la resistencia parece inevitable, Spencer está dirigiendo ahora su mirada escrutadora hacia el comportamiento del insecto, con la esperanza de averiguar qué individuos son más proclives a desplazarse y diseminar consigo los caracteres problemáticos, pues no todos se dispersan por igual. Es posible que ese conocimiento ayude a contener la plaga, explica, y ayudará a las agroquímicas a diseñar y desplegar el próximo avance acorde con el comportamiento de los insectos.

En una húmeda tarde del pasado julio, él y un grupo de alumnos colaboradores se dirigía hacia la Lost 40, una parcela de ensayo situada cerca de los laboratorios del INHS, donde cuatro andamios amarillos de diez metros se ciernen sobre los campos. Spencer echa mano a un cazamariposas y a una nevera con viales rellena de hielo carbónico, los cuelga en un mosquetón y se dispone a subir a uno de los andamios. «¡Vamos allá! ¡A contemplar las mejores vistas de Illinois!» Tres ayudantes se dirigen a las otras tres plataformas: dos se alzan sobre el maíz y la tercera domina un cuadro estriado de soja. Otros estudiantes se apostan en puntos repartidos en fila por los campos. «¡Todos atentos a los *walkie-talkies*!», avisa Spencer. Es la viva imagen del explorador: sombrero de ala ancha, pañuelo caqui anudado al cuello, pantalón de excursionista, cronómetro, gafas y una panoplia de bolígrafos en el bolsillo de la camisa. Agita en el aire su cazamariposas. «En 40 segundos dará comienzo la recolección 6:17», anuncia.







EN BUSCA DE UN PUNTO DÉBIL: En un invernadero, Spencer cultiva maíz que segrega una toxina que mata a los coleópteros (*1*). Aquí examina larvas de diabrótica con una lupa binocular (*2*). En un laboratorio de investigación, se aguarda durante cinco meses hasta que los huevos del escarabajo eclosionen y nazcan las larvas (*3*). Una vez nacidas, se las separa de las raíces con lámparas calefactoras y se las recoge en el fondo de embudos (*4*).



El equipo tiene previsto llevar a cabo ocho períodos de recolección de 10 minutos cada uno, durante los cuales atrapará tantas diabróticas adultas como sea posible. Con ello, Spencer espera conocer mejor las poblaciones itinerantes y las residentes, y si los escarabajos que toleran el maíz con Bt y la rotación de los cultivos son más propensos a abandonar sus campos natales. Algunos son grandes viajeros. Una vez que se alzan por encima de la capa de aire turbulento bajo los andamios, emprenden un largo camino. Pueden salvar distancias de hasta 150 kilómetros si son arrastrados por las corrientes convectivas ascendentes de las tormentas. Spencer conserva viejas fotografías donde miles de millones de estos escarabajos aparecen amontonados a orillas del lago Michigan en espesores de un palmo tras una de esas tormentas.

Desde arriba, el maíz semeja una banda multitudinaria de músicos, con sombreros de flecos y hacinados hasta extremos imposibles. Cuando Spencer llegó por primera vez a Illinois, a veces atrapaba hasta 15 escarabajos por minuto. «Llovían escarabajos.» Pero las poblaciones de este insecto han ido a la baja en los años posteriores a la difusión del Bt, y las inundaciones de la primavera de 2015, que ahogaron a las larvas enterradas, acabaron por diezmar aún más su número. Ese verano solo capturó nueve adultos en toda la temporada. Calcula que el esfuerzo cuesta a su laboratorio unos 3150 dólares por cada gramo de escarabajo, en mano de obra y material: más de 80 veces el precio del oro.

El sol desciende sobre la jungla de maíz. Spencer entrevé algo a unos metros. Corre por el andamio, se abalanza sobre la barandilla alargando todo el brazo y agita el cazamariposas. «¡Uau! ¡He atrapado uno!» Examina el ejemplar cautivo, lo introduce en un vial, abre la nevera y lo congela en el acto. Es uno de los nueve que el equipo atrapará esa noche.

A la mañana siguiente los diseccionarán en el laboratorio, los triturarán uno a uno y analizarán el contenido de su intestino. Los campos que circundan los andamios están plantados con dos tipos de maíz transgénicos con sendos caracteres de Bt. Tras sumergir tiras reactivas en el «licuado de insecto», Spencer escruta el aparato digestivo de los escarabajos para averiguar qué proteínas albergan sus tripas y deducir dónde se han alimentado durante las 24 horas anteriores. Si un ejemplar da positivo para un carácter ausente en sus campos o para dos caracteres distintos, sabe que ese escarabajo es un «nómada». El equipo también planta tiendas con malla mosquitera en mitad de los maizales y succiona los escarabajos con aspiradoras domésticas modificadas que recuerdan a las «mochilas de protones» de los Cazafantasmas. Si esos escarabajos proceden de campos sembrados con la variedad provista de la toxina de Bt, sabe que han adquirido resistencia.

Spencer se sienta ante la lupa binocular y coloca en la platina una larva, de entre dos y tres milímetros de largo y color blanco. Es en este estadio biológico cuando la diabrótica devora las raíces del maíz y causa la mayor parte de su daño milmillonario. A continuación, coloca seis adultos negriamarillos bajo la lupa; corretean arriba y abajo por la jaula de plástico transparente. Una hembra grávida se aposta en una esquina con una barba de maíz. En un abrir y cerrar de ojos engulle los filamentos sin dejar migaja. El abultado abdomen lustroso se hincha aún más y un espumarajo acaba cubriendo su morro. Casi me atrevería a decir que es preciosa. Pero su glotonería —su irrefrenable instinto por sobrevivir y procrear— es todo menos eso.

ATAQUE GENÉTICO

Las empresas agroquímicas no han tirado la toalla en su lucha contra este adversario voraz, en absoluto. Monsanto, DuPont Pioneer, Syngenta y Dow Agro Sciences comercializan semillas genomodificadas que matan la diabrótica y han sabido reaccionar ante la creciente resistencia del insecto a sus productos. En 2009 comenzaron a combinar varias toxinas de Bt en una misma planta de maíz. Estas variedades con «genes apilados», como se denominan en la jerga del sector, suponen una estrategia más eficaz para retrasar la resistencia, pues actúan a través de canales distintos, a semejanza del cóctel de fármacos que controla el VIH en el ser humano. Después de aquel verano de pesadilla de 2013, Wyllie adoptó una variedad de maíz provista de varios genes de Bt apilados con la que ha logrado controlar la plaga. Pero con la eficacia de tres de los cuatro caracteres comercializados en declive, en los próximos años tal vez no haya nada más que sumar. Si un carácter que flaquea se combina con otro que está funcionando, este último, sin la protección del primero, resulta más vulnerable. Los agricultores necesitan nuevos ingredientes que añadir al cóctel de genes. Los investigadores de DuPont Pioneer anunciaron recientemente el descubrimiento de un nuevo gen bacteriano de efecto larvicida, pero como se precisan unos 12 años y unos 136 millones de dólares para someter un nuevo

La amenaza de la diabrótica en España

La plaga, llegada a Europa hacia los años ochenta, se está extendiendo con gran rapidez y parece inevitable que alcance nuestro país

XAVIER PONS

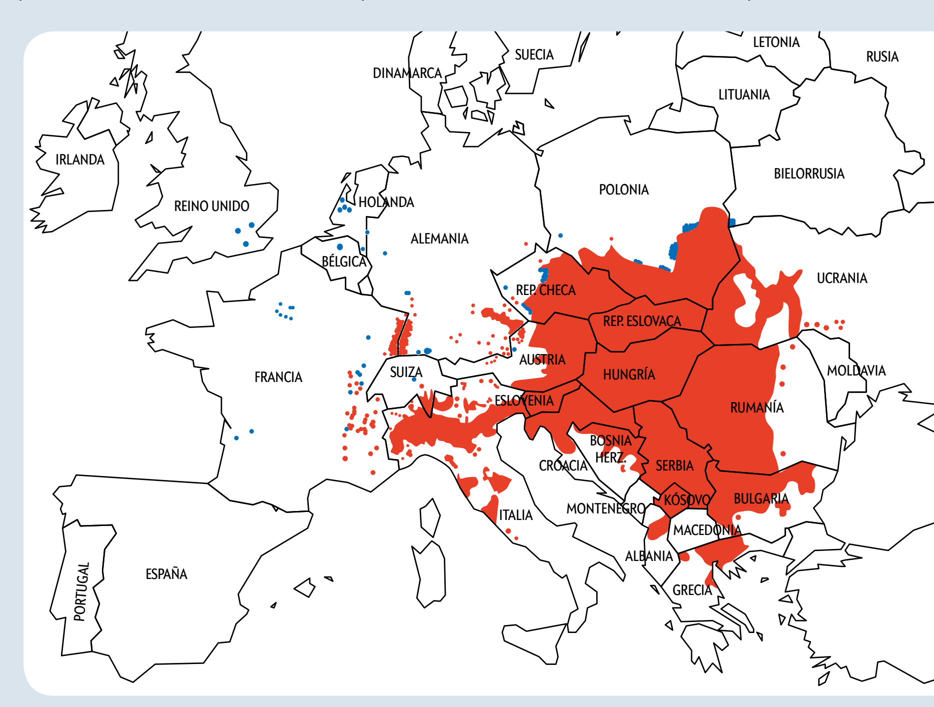
La diabrótica constituye un ejemplo claro de lo que es una plaga invasora favorecida por la actividad humana y de cómo un insecto puede adaptarse y superar las estrategias de control para combatirla. Aunque su efecto es mucho menor que en Estados Unidos, representa la principal plaga del maíz en el centro de Europa y afecta a más de la mitad de la superficie de su cultivo en la Unión Europea. Hasta la fecha, no se ha registrado su presencia en España.

El insecto se detectó por primera vez en nuestro continente en 1992: en un pequeño campo de maíz, cerca del aeropuerto de Belgrado, se halló un buen número de individuos, tanto en la fase larvaria como en la adulta, y se observaron los primeros daños en las plantas. Se estima que la llegada de la plaga a Europa se produjo a mediados de los ochenta. Desde entonces, el insecto se ha detectado en más de veinte países.

La dispersión de la diabrótica se produce gracias a la capacidad de los adultos para volar (se calcula que pueden avanzar unos cincuenta kilómetros al año). Pero también es diseminada por la actividad humana relacionada con el transporte. Los adultos pueden desplazarse en el interior de vehículos terrestres (camiones, coches) y aéreos (aviones). De hecho, se considera que el insecto llegó a Belgrado en avión desde Chicago, y muchos de los nuevos registros sobre el insecto en los países europeos se han dado en campos de maíz próximos a aeropuertos. Por consiguiente, los puntos de inspección clave para su detección son maizales cercanos a los aeropuertos, las áreas de servicio, los estacionamientos para camiones en autopistas o carreteras con elevado tráfico y las estaciones de tren.

Desde el área de Belgrado, la diabrótica se extendió por Europa, primero por el valle del Danubio y después por el resto de los países centroeuropeos. Los afectados más occidentales son Francia, Suiza, Alemania e Italia. En este último, la plaga se halla muy extendida en los maizales del valle del Po, en el norte.

En el año 2000, la Unión Europea declaró la diabrótica una plaga de cuarentena y, en 2003, decidió establecer un protocolo, de cumplimiento obligatorio por parte de todos los países miembros, para la detección e implementación de medidas de emergencia contra la propagación del insecto (Decisión 2003/766/CE). Estas medidas consistían en poner en marcha un sistema de detección precoz



Desde su foco inicial en Serbia, la diabrótica se ha propagado por el este y el centro de Europa (*rojo*), como muestra este mapa de la distribución de la plaga en 2012. En algunos de los puntos donde se había detectado en años anteriores se ha conseguido erradicar o no ha vuelto a observarse (*azul*).

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA SEGÚN J. KISS Y C. R. EDWARDS. MAPAS DE LA DIABRÓTICA DEL GRUPO INTERNACIONAL DE TRABAJO SOBRE OSTRINIA Y OTRAS PLAGAS DEL MAÍZ (IWGO), 2012.

carácter genomodificado al proceso regulador, los agricultores no podrán disponer de él en breve.

Con todo, hay otro nuevo ingrediente que podría incorporarse antes del cóctel. Monsanto ha iniciado la solicitud de autorización para una semilla de maíz que conjuga dos viejas toxinas de Bt con una nueva técnica basada en el ARN de interferencia, o ARNi. Esta se sirve de un ARN dirigido (la molécula ubicua que transmite la información genética y que interviene en la síntesis proteica) para silenciar total o parcialmente genes específicos. Cuando las larvas de la diabrótica devoran el maíz, segmentos de ARN bicatenarios producidos por la planta genomodificada se unen y alteran un gen del insecto que codifica proteínas esenciales para el almacenamiento y la eliminación de los residuos celulares. Sin esas proteínas, la larva muere.

El ARNi en cuestión ha recibido la autorización preliminar del Departamento de Agricultura de EE.UU. (USDA) y de la EPA, por lo que Monsanto espera que la semilla de maíz definitiva con Bt-ARNi reciba el visto bueno de dicha agencia antes de que acabe la década. De ser así, sería la primera aplicación a gran escala del ARN de interferencia en el cultivo del maíz. (Monsanto dispone en este momento de permiso para ensayar el producto en parcelas experimentales al aire libre.)

Es una técnica prometedora. Los plaguicidas tradicionales actúan como bombas incendiarias que destruyen indiscriminadamente no solo el objetivo, como la diabrótica, sino también otros insectos beneficiosos, especies acuáticas, aves y mamíferos. En cambio, el ARNi actúa como un francotirador selecto, a través de secuencias genéticas sintéticas que solo reconocen

de la plaga mediante la instalación de trampas a base de feromonas sexuales, en particular en los países aún no afectados. En el caso de que la plaga se detectara, el protocolo establecía un plan de erradicación y, si este fallaba, un plan de contención y control para reducir las poblaciones. A pesar de estas medidas, no se consiguió impedir la propagación del insecto y, en 2014, la decisión fue derogada (Decisión 2014/62/UE). Uno o varios de los siguientes motivos explicaría la extensión incesante de la plaga: el desplazamiento propio o por causas antrópicas del insecto; la falta en algunos casos de una buena gestión de las administraciones y de los agricultores que acompañe las medidas de erradicación y contención; y la inexistencia, por el momento, de medidas de control que resulten cien por cien eficaces.

En la actualidad, la Comisión Europea recomienda la rotación de cultivos, es decir, no sembrar maíz año tras año y alternar este cultivo con otros (Recomendación 2014/63/UE). Tal estrategia resulta más efectiva en nuestro continente que en Estados Unidos debido a las menores dimensiones de los campos y a la variedad de cultivos con que el maíz puede rotarse. La segunda alternativa de control se basa en la aplicación de insecticidas al suelo. La estrategia empleada en EE.UU. de siembra de variedades de maíz transgénico Bt, que producen proteínas Cry específicas contra coleópteros, no está permitida en la Unión Europea. Sin embargo, no debe olvidarse la capacidad de superación de las barreras de control que la diabrótica ha demostrado en esa zona, donde se ha adaptado al sistema de rotación de cultivos y ha desarrollado resistencia a insecticidas y a la toxina del maíz Bt.

Nuestro país, como se ha comentado, aún no se ha visto afectado por la plaga. Los informes del Ministerio de Agricultura, Alimentación, Pesca y Medio Ambiente refieren que las prospecciones anuales llevadas a cabo de 2004 a 2013 con trampas de detección en más de 250 puntos de observación en todo el territorio español han dado resultados negativos. Sin embargo, la llegada del insecto es, probablemente, una cuestión de tiempo, y así lo indican los distintos modelos de propagación que se han desarrollado en Europa, atendiendo a criterios de clima, del área de cultivo del maíz, de la abundancia del insecto y de sus tasas de crecimiento y dispersión. Si la diabrótica ha traspasado fronteras naturales y políticas en Europa, sería ingenuo pensar que no llegará algún día a España.

Xavier Pons *es catedrático del departamento de producción vegetal y ciencia forestal de la Universidad de Lérida.*

a la víctima, y que, acabada su misión, se esfuman (el ARN se degrada con rapidez en el entorno). «Es el plaguicida ideal», afirma Stephen Levine, toxicólogo de Monsanto. «Es específico, hace lo que ha de hacer y después desaparece.»

O eso es al menos lo que debiera suceder en teoría, pues un artículo publicado en 2012 por investigadores chinos describió el hallazgo de fragmentos de ARN procedentes de plantas cultivadas en el hígado de ratones que las ingerían. El ARN afectaba a un gen regulador del colesterol presente también en los humanos. Tal efecto causó estupor porque se creía que ese tipo de ARN no sobrevivía en el entorno hostil que supone el intestino de los mamíferos; si es cierto, no puede descartarse la posibilidad de que los ARNi vegetales afecten al ser humano. Otro estudio presentado en una conferencia en 2013 afirmaba que el ARN creado para exterminar la diabrótica también podía acabar con las mariquitas, un coleóptero beneficioso muy apreciado. Ese mismo año, Jonathan Lundgren, entomólogo entonces en el Laboratorio Central de Investigaciones Agrícolas del Norte, dependiente del USDA y sito en Brookings, en Dakota del Sur, publicó un artículo donde insinuaba que el ARNi podía perjudicar a otros organismos inocuos de modos inesperados. El experto también denuncia que el USDA puso trabas a la publicación de otro artículo suyo sobre los ARNi y el genoma de la abeja melífera. Desde entonces ha renunciado a su cargo y ha entablado un pleito legal con las autoridades federales. «No estoy en contra de los ARNi, pero la exposición que puede derivar de un producto destinado al maíz es enorme.»

En opinión de Martha Crouch, del Centro para la Seguridad Alimentaria, el ARNi es el perfecto ejemplo de la confusión que envuelve a las técnicas incipientes, que de buen principio parecen prometer solo progresos hasta que llega el momento de consternación, cuando sobreviene algo imprevisto y nocivo, como sucedió con el agujero de ozono, con los pijamas infantiles que contenían sustancias cancerígenas, o con las diabróticas del tamaño de ratas. «Hay demasiadas lagunas en nuestro conocimiento», sentencia Lundgren.

Pero muchos científicos opinan que hay pruebas más que suficientes de su seguridad. A pesar de múltiples tentativas, otros investigadores no han podido reproducir los resultados obtenidos con los roedores. Durante la evaluación que precedió a la concesión del permiso preliminar para la planta de maíz genomodificada con ARNi de Monsanto, un comité de la EPA llegó a la conclusión de que no había argumentos convincentes de que el ARN bicatenario sea absorbido por el intestino humano o de otros mamíferos de modo tal que provoque daños. «¿Qué probabilidad hay de que resulte perjudicial para el hombre? Prácticamente nula», asegura Craig Mello, biólogo molecular de la facultad de medicina de la Universidad de Massachusetts, descubridor del ARNi en 1998 y premio nóbel en 2006 por tal logro. El ARNi es sumamente específico para cada ser vivo, añade la toxicóloga de Monsanto Pamela Bachman. La diabrótica comparte algunas secuencias génicas con otros insectos, entre ellas la que mató a las mariquitas en



TERROR EN MINIATURA: Las larvas, gusanos de apenas dos milímetros de largo, causan estragos a pesar de su talla diminuta. Cada año generan pérdidas por valor de cientos de millones de dólares a los productores de maíz.

el estudio de 2013. Pero el producto de Monsanto reconoce una secuencia que no poseen las mariquitas ni otros insectos presentes en las proximidades de los maizales. «La secuencia es determinante», concluye.

CONTENCIÓN

En la finca de 900 hectáreas que David Masching cultiva en las afueras de Piper City, Spencer se reúne con un grupo de productores de maíz, entre ellos Wyllie. Permanecen sentados ante una mesa en un granero que más bien parece un hangar, con una cubierta altísima que alberga el impresionante repertorio de maquinaria agrícola de su propietario.

Los asistentes visten gorra, botas de trabajo y camiseta. Ninguno cultiva menos de 400 hectáreas y todos trabajan sus tierras en solitario, con la ayuda puntual de familiares y temporeros. Aun así, los márgenes son escasos. En 2012, cuando el precio del maíz rondaba los 7 dólares por fanega (una fanega son unos 25 kilogramos), un productor del norte de Illinois podía obtener más de 750 dólares netos por hectárea, una vez descontado el coste de las semillas, el fertilizante, el carburante, el arrendamiento y los tratamientos fitosanitarios. Pero el precio se desplomó en 2015, y los agricultores perdieron 160 dólares por hectárea plantada. «No cuesta entender por qué los productores no dan cuartel a la diabrótica.»

Ni a ninguna otra plaga, si vamos al caso, explica un colega jubilado de Spencer, Michael Gray, que acompaña a este en el granero de Masching. De camino a Piper City, Spencer me señala una avioneta de fumigación, con el tanque cargado de fungicidas e insecticidas piretroides de amplio espectro, que vira y vuela rasante sobre los campos. En la mayoría de los maizales sembrados en Illinois cuesta encontrar un bicho. «Como entomólogo resulta desconcertante adentrarse en un campo de maíz y no ver un insecto viviente», confiesa Spencer. «El suelo es estéril. Eso es lo que desea el productor.»

Los agricultores quieren seguridad, venga encapsulada en las semillas genomanipuladas o caída del cielo por obra de los fumigadores, por más que esa «obsesión por la seguridad», como Spencer la describe, acelere la espiral de agroquímicos y resistencia. Los agricultores desean por encima de todo previsibilidad. Donde antaño se alternaban maíz, trigo, alfalfa, sorgo y avena, ahora solo se rotan maíz y soja, y maíz y soja de nuevo. Y la diabrótica medra en la previsibilidad. El monocultivo facilita la labor del agricultor, que puede llegar a cultivar él solo hasta 800 hectáreas. Pero también simplifica las cosas a la diabrótica, que puede arrasar de un plumazo toda esa extensión. «Nosotros hemos creado la plaga», afirma Gray. «Le hemos dado una vida de fábula», añade Spencer.

Las cosas no han marchado tan bien para la diabrótica en Europa, donde aterrizó a inicios de los años noventa, al parecer en un vuelo sin retorno desde Chicago hasta Serbia, desde donde inició su expansión. Su salto transatlántico hizo presagiar a los agricultores europeos las mismas escenas de devastación vistas en EE.UU. Pero en el Viejo Continente las explotaciones no son tan vastas, sus gestores cultivan menos maíz y lo alternan con una mayor variedad de vegetales. Y si bien la diabrótica causa daños en ciertas regiones donde los campos se destinan en exclusiva al monocultivo del maíz, en general sus efectivos permanecen controlados. «La diabrótica no es un problema en Europa», sentencia el investigador Stefan Vidal, de la Universidad de Gotinga, que ha ayudado a coordinar la respuesta contra el invasor, financiada por la Unión Europea. Para los agricultores europeos, la diversidad es la mejor defensa.

En cambio, en el cinturón del maíz estadounidense, los cultivadores no creen tener esa opción. Son demasiado grandes como para permitirse el lujo de una cosecha ruinosa, subyugados por la economía de escala, que abarca de un extremo del horizonte al otro, y las inversiones tecnológicas, que les permiten ganarse la vida en el mercado hiperespecializado de materias primas de Estados Unidos: las cosechadoras de 400.000 dólares, los graneros del tamaño de hangares, los plaguicidas, las semillas transgénicas y el ARN bicatenario. Todo se ha convertido en una escalada de armamentos que ineludiblemente quedan obsoletos con el tiempo.

El cerebro de la diabrótica es tan minúsculo que resulta difícil de diseccionar, pero la evolución posee su propia inteligencia. «Es una lección que no hemos aprendido, aunque se repite una y otra vez. La selección natural siempre acabará ganando la partida», lamenta Spencer. IyC

Aclaración: En 2014, Nordhaus moderó una mesa redonda organizada por Monsanto acerca de las abejas melíferas en una conferencia sobre el ambiente. Esta empresa sufragó sus gastos de viaje.

PARA SABER MÁS

Adaptation of the Western corn rootworm to crop rotation: Evolution of a new strain in response to a management practice. Eli Levine et al. en *American Entomologist*, vol. 48, n.º 2, págs. 94-107, 1 de abril de 2002.

Field-evolved resistance to Bt maize by Western corn rootworm: Predictions from the laboratory and effects in the field. Aaron J. Gassmann en *Journal of Invertebrate Pathology*, vol. 110, n.º 3, págs. 287-293, julio de 2012.

RNAi-based insecticidal crops: Potential effects on nontarget species. Jonathan G. Lundgren y Jian J. Duan en *BioScience*, vol. 63, n.º 8, págs. 657-665, agosto de 2013. **bioscience.oxfordjournals.org/content/63/8/657.short**

Cuestiones científicas consideradas por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. en relación con la técnica del ARNi: Formulación de programas para la salud humana y evaluación de riesgos ecológicos. Reunión del grupo asesor científico sobre la Ley Federal de Insecticidas, Fungicidas y Rodenticidas. Arlington, Virginia, 28 de enero de 2014. **www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/012814minutes.pdf**

EN NUESTRO ARCHIVO

Plagas. Resistencia del maíz al taladro. Rosa Ana Malvar en *IyC*, febrero de 1999.

Interferencia de ARN. Nelson C. Lau y David P. Bartel en *IyC*, diciembre de 2003.

Agricultura transgénica. Terri Raney y Prabhu Pingali en *IyC*, de 2007.

¿DEBE SECUENCIARSE EL GENOMA DE LOS RECIÉN NACIDOS?

Realizar pruebas a todos los neonatos para detectar una serie de trastornos genéticos es técnicamente posible, pero podría resultar más perjudicial que ventajoso

Bonnie Rochman

En 2010, Jennifer García dio a luz a un niño, un hermano pequeño para su hijo de cuatro años. Le llamó Cameron. En ambos embarazos, García se había sometido a pruebas prenatales para detectar posibles enfermedades, como el síndrome de Down o la fibrosis quística. Los resultados fueron negativos. Cuando nacieron, no dudó en que se les practicara una punción en el talón para obtener unas gotas de sangre. Estas se analizan para descartar unas treinta enfermedades conocidas, lo que constituye el cribado neonatal estándar que se aplica en los hospitales de su estado, Tejas.

Transcurrieron los meses y Cameron crecía, levantaba la cabeza y sonreía a sus padres. Parecía sano y fuerte, rondando el percentil 90.º en peso y talla para bebés de su edad. Se reía con el perro de la familia. Aprendió a recorrer la habitación volteándose para alcanzar un juguete. Pero a los siete meses enfermó de neumonía. En el hospital sufrió crisis convulsivas y le tuvieron que intubar. Le hicieron escáneres, resonancias magnéticas, electroencefalogramas y punciones lumbares y precisó varias transfusiones de sangre.

Nadie sabía lo que ocurría. Al principio, los médicos creyeron que se trataba de meningitis, luego tosferina, y después pensaron en tuberculosis. Ante la duda, le pautaron medicación para las convulsiones, además de antibióticos, antivíricos y antifúngicos para cubrir cualquier posibilidad. Fue valorado por especialistas de todo tipo: equipos de cuidados intensivos, pediatría, neurología, epileptología, toxicología, inmunología, enfermedades infecciosas y terapia respiratoria. Finalmente, a los diez días de haber ingresado en un hospital de referencia de Houston, vislumbraron lo que aquejaba a Cameron. Un especialista en inmunología clínica sospechó que padecía inmunodeficiencia combinada grave (IDCG), un trastorno genético también conocido como síndrome del «niño burbuja». Los afectados presentan un sistema inmunitario deficiente. Por eso Cameron no estaba mejorando.

García y su marido se quedaron perplejos ante el diagnóstico. No tenían antecedentes familiares de IDCG; de hecho, nunca habían oído hablar de la enfermedad. En cualquier caso, ¿no debería haberse detectado en las pruebas de punción del talón que le practicaron a Cameron? García comenzó a investigar. Cuál fue su asombro cuando averiguó que el trastorno puede detectarse con el mismo sistema de gotas de sangre en papel secante que emplea el Departamento de Servicios de Salud del Estado de Tejas en el cribado neonatal. Por esas fechas, Tejas, al igual que la mayoría de los otros estados, no incluía la IDCG en su cribado. Cuando se diagnostica pronto, antes de que el niño esté gravemente enfermo, puede practicársele un trasplante de médula ósea. La intervención suele curar esta pato-

Adaptado de The gene machine: How genetic technologies are changing the way we have kids—and the kids we have*, por Bonnie Rochman, mediante un acuerdo con Scientific American/Farrar, Straus and Giroux (EE.UU.).*



STEPHEN MARKS, GETTY IMAGES



Bonnie Rochman, periodista, escribe sobre temas de ciencia, salud y crianza. Trabajó previamente como columnista en la revista *Time* y ha colaborado con *The New York Times Magazine* y con *Wall Street Journal*, entre otras publicaciones.

logía mortal, ya que reemplaza el sistema inmunitario deficiente por una versión sana del mismo. De los niños que reciben un trasplante en los primeros tres meses y medio, más del 90 por ciento se recupera. Cameron ya tenía ocho meses cuando recibió el diagnóstico, y por entonces ya estaba gravemente enfermo, luchando por su vida.

Como es lógico, la madre de Cameron llama la atención sobre las consecuencias de no realizar pruebas para detectar una enfermedad, cuando ello es técnicamente posible. Su hijo había nacido justo un mes después de que la IDCG fuera añadida a la lista nacional de enfermedades esenciales en el cribado neonatal. Aún transcurrirían dos años más antes de que el estado de Tejas comenzara a realizar pruebas sobre esa dolencia a todos los recién nacidos. Fue demasiado tarde para Cameron, que falleció el 30 de marzo de 2011. Tenía nueve meses.

Desde que salió del hospital sin Cameron en sus brazos, García se ha convertido en una activista que, en última instancia, ha resultado clave para persuadir al estado de Tejas de que incluyera la IDCG en su programa de cribado neonatal. Saber que ahora se descarta esta enfermedad en todos los recién nacidos del estado ayuda en parte a sobrellevar la pérdida de su hijo. «Deseaba que la corta vida de Cameron hubiera significado algo, no solo para nuestra familia... Quería que la gente supiera que este pequeño bebé logró cambiar las cosas y abrirle los ojos a muchas personas...», expresó García en un vídeo sobre la importancia del cribado de la IDCG. «Si hubiéramos sabido que Cameron sufría IDCG, si lo hubiéramos detectado a tiempo, antes de que empezara a contraer las infecciones, puedo afirmar con absoluta certeza que hoy estaría aquí con nosotros.»

Pero ¿y si fuera posible no tener que pasar por el laborioso proceso de añadir, una tras otra, nuevas enfermedades a la lista de patologías que se detectan en el cribado neonatal? ¿Y si pudiéramos identificar las que ya detecta el cribado, y muchas más, con una sola prueba?

La pregunta no es una mera hipótesis. Los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU. han promovido una investigación pionera con el fin de que se revise lo que ya conocemos sobre la salud desde los primeros momentos de la vida. Han encargado a cuatro centros médicos universitarios que investiguen cuáles serían las implicaciones médicas, conductuales, económicas y éticas de realizar la secuenciación genómica para conocer el mapa genético completo de los recién nacidos. ¿Es aconsejable secuenciar el genoma de todos los bebés?



CON LA PRUEBA de la punción del talón se descarta una variedad de trastornos genéticos en los recién nacidos. Esta misma prueba puede proporcionar suficiente sangre para detectar muchas más enfermedades.

UN TEMA ESPINOSO

Existen ventajas evidentes. Se identificaría a muchos más niños cuya vida corre peligro y depende, como la de Cameron García, de una detección precoz, lo que permitiría iniciar un tratamiento a tiempo. Pero, inevitablemente, algunos padres tendrían que lidiar con el hecho de saber que sus hijos padecen un problema de salud incurable, o que son portadores de una de las muchas alteraciones genéticas llamadas variantes de significado incierto. El impacto de estas últimas se desconoce: pueden suponer un trastorno grave o representar tan solo un caso más de las variaciones aleatorias que se dan en el genoma.

En función de los resultados recibidos, muchos padres y madres acabarían por entender que el grueso del genoma de sus hijos es aún incomprensible. Michelle Huckaby Lewis, pediatra y abogada que investiga políticas genéticas en el Instituto de Bioética Berman de la Universidad Johns Hopkins, considera que ello podría acarrear problemas. «No habrá suficiente personal especializado en los campos de genética y sus subespecialidades para responder a la creciente demanda», escribió en un artículo publicado en *JAMA Pediatrics*. «Lo que es peor, las consultas de los subespecialistas podrían llenarse con niños

EN SÍNTESIS

Numerosas enfermedades graves que pueden detectarse después del nacimiento no están incluidas en las pruebas genéticas neonatales habituales.

Secuenciar por completo el genoma de recién nacidos para identificar trastornos actuales o futuros resulta técnicamente factible y en breve podría serlo también económicamente.

Se está estudiando si la inmensa cantidad de información genética que aporta la secuenciación ayudará a los padres y a los médicos a atender mejor a los recién nacidos o, de lo contrario, conllevará mayor ansiedad, dificultades y coste.

DAN McCOY, GETTY IMAGES

cuyas patologías pueden manifestarse más tarde a lo largo de la vida, lo que dificultaría la atención de aquellos con necesidades más urgentes.»

Al margen de ello, parece que la sanidad se mueve en esa dirección. «Nos dirigimos a un mundo en el que la tecnología será tan eficaz y barata que resultará muy tentador aplicar la secuenciación genómica no solo en personas enfermas, sino en las sanas también», afirma el genetista Robert C. Green. Él es uno de los responsables del proyecto BabySeq, un estudio sobre cribado neonatal que está realizándose a caballo entre el Hospital Brighan y de Mujeres, filial de la Universidad Harvard, y el Hospital Pediátrico de Boston, uno los cuatro centros con financiación pública.

BabySeq investiga cómo los padres y los médicos pueden usar la información genética para mejorar la salud de los niños. Green y su colaborador Alan Begg están estudiando a 240 neonatos enfermos y 240 neonatos sanos. Se secuencia el genoma de la mitad de los bebés de cada grupo, escogidos al azar, para valorar si los padres de niños enfermos responden a los resultados de forma diferente que los padres de niños sanos. ¿Les ayuda esa información a los primeros, mientras que la consideran abrumadora los segundos? ¿Prefieren los dos grupos la versión limitada que ofrece el cribado tradicional? ¿Cómo pueden los médicos manejar mejor esa ingente cantidad de información para atender a los pacientes más jóvenes y vulnerables? Green se propone averiguar si las pruebas resultan útiles o, de lo contrario, generan temor y más confusión en la gente.

¿Cómo pueden los médicos manejar mejor esa ingente cantidad de información para atender a los pacientes más jóvenes y vulnerables?

Antes de iniciar el estudio, Green y sus colaboradores encuestaron a personas que acababan de ser padres para preguntarles si deseaban secuenciar el ADN de su bebé. Una inmensa mayoría se interesaron por el tema. Tres meses más tarde, ofrecieron más detalles a los progenitores y les explicaron el tipo de información exacta que proporcionaría la prueba: riesgo de cáncer, por ejemplo, o predisposición para la enfermedad de Parkinson.

Apenas varió el porcentaje de padres interesados. «Ello indica que existe un gran anhelo por aplicar la prueba, incluso en niños sanos», afirma Green. «Va a ser difícil resistirse.» Pero secuenciar el genoma de un bebé y entregar, sin más, los resultados a la familia puede ser peligroso, comenta. Resulta especialmente delicada la combinación de unos padres ansiosos y unos médicos intentando interpretar resultados aún inciertos. «La gente tolera mejor las malas noticias sobre ellos mismos que sobre sus hijos», apunta Green. «La cuestión fundamental consiste en valorar el mal que puede ocasionarse. Dependiendo de con quién hable uno, existen diversas teorías sobre los posibles daños: ansiedad, sufrimiento, información malinterpretada. Todo ello resulta aún más relevante cuando se está hablando de bebés, que no tienen opción de elegir. Esta es la primera oportunidad para investigar los daños asociados a la prueba.»

PENSAR EN EL FUTURO

Cuando visité Boston en la primavera de 2015, el proyecto estaba a punto de incorporar el primer neonato. Pensé que me encontraría con un investigador, quizá dos, pero me recibieron media docena de ellos en la sala de conferencias del hospital: neonatólogos, genetistas, consejeros genéticos. Si es necesario un pueblo entero para educar a un niño, sin duda también lo es para debatir los detalles de la secuenciación de su genoma. Los expertos explicaron que BabySeq (que a finales de 2016 ya contaba con la participación de unas cien familias) solo entregaría a los padres los resultados relativos a alteraciones genéticas ligadas a enfermedades que aparecen en la infancia. También se incorporarían al estudio los padres y el pediatra de cada niño, con el objetivo de evaluar la evolución médica y los efectos de la prueba en el vínculo paterno-filial, además de conocer si la información aportada por ella resulta útil y cómo se incorpora en el cuidado de la salud del niño. En otras palabras, ¿podemos decir que el flujo masivo de información derivado de la secuenciación genómica se traduce en una mejor asistencia sanitaria para el niño? ¿Se justifica entonces el coste económico y emocional?

«Si imaginamos un mundo en el que se secuencia el genoma de todos los bebés, ¿cómo usarían sus médicos esa información para facilitar su atención, para diagnosticarles y prescribirles medicación?», se pregunta Green. «Estamos intentando figurarnos esa situación en un momento en que aún no es fácil ni barato secuenciar el genoma, ni los médicos están acostumbrados a manejar tal información. Estamos intentando proyectar el futuro». No un futuro lejano o especulativo, si nos basamos en las predicciones de Green. «Estoy sugiriendo que, en solo cinco años, la secuenciación se ofrecerá de forma gratuita», sostiene. IyC

PARA SABER MÁS

Newborn screening controversy: Past, present, and future. Michelle Huckaby Lewis en *JAMA Pediatrics*, vol. 168, n.º 3, págs. 199-200, marzo de 2014.

Psychosocial factors influencing parental interest in genomic sequencing of newborns. Susan E. Waisbren et al. en *Pediatrics*, vol. 137, suplemento 1, págs. S30-S35, enero de 2016.

The BabySeq Project: Preliminary findings from a randomized trial of exome sequencing in newborns. R. C. Green et al. Presentado a la Reunión anual de la Asociación Americana de Genética Humana celebrada en Vancouver, 18-22 de octubre de 2016.

BIODIVERSIDAD

LA INVASIÓN DE



LA PRIMERA PLANARIA terrestre invasora, *Bipalium kewense*, fue descubierta en 1878 en el Real Jardín Botánico de Kew, en las afueras de Londres. Oriunda del sudeste de Asia y arribada a Inglaterra a través del comercio hortícola, desde entonces se ha diseminado por buena parte del globo.

LAS PLANARIAS

Ocultas en plantas importadas, algunas especies de este grupo de gusanos de cuerpo aplanado están conquistando los cinco continentes

Ronald Sluys

«SEGURAMENTE UN MILLÓN DE ESTADOUNIDENSES, o tal vez más, han oído por primera vez la palabra *planaria* gracias a mí», me aseguraba en 2015 mi colega Jean-Lou Justine, experto en planarias del Museo Nacional de Historia Natural de París, en un correo electrónico. Un año antes, Justine anunció el descubrimiento en Francia de una planaria terrestre originaria de Nueva Guinea, *Platydemus manokwari*, que la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza califica como una de las cien especies invasoras más dañinas. Era la primera vez que se tenía noticia de su presencia en suelo europeo. Notoria por su fácil propagación y por su apetito voraz, amenaza a las lombrices y los caracoles autóctonos y altera el ecosistema local. Apenas un año más tarde, Justine anunció que había hallado ejemplares de *P. manokwari* en Estados Unidos. Antes de su desembarco en ambos continentes, la llamada planaria de Nueva Guinea ya era fuente de problemas en un puñado de islas del Indo-Pacífico, pero no había alcanzado ninguna masa de tierra extensa, por lo menos que se sepa. Ahora parece surgir por doquier, y no es la única.

EN SÍNTESIS

Las planarias terrestres, un grupo de gusanos aplanados formado por más de 900 especies, habitan típicamente en selvas tropicales o bosques húmedos. Sin embargo, los humanos hemos favorecido su propagación en diversos lugares del planeta.

Debido a su gran adaptabilidad y voracidad, varias especies están invadiendo numerosas zonas y están provocando el declive de organismos autóctonos, como lombrices y caracoles, con la consiguiente degradación de los ecosistemas.

En los últimos años, el registro de nuevas planarias invasoras no ha cesado de crecer en Europa, una tendencia que no muestra signos de frenarse. Resulta esencial emprender medidas de control, aunque la mayoría de los países todavía no contempla estas especies en su legislación relativa a las invasiones biológicas.

Ronald Sluys es especialista en planarias del Centro de Biodiversidad Naturalis de Leiden, Países Bajos.



Las planarias terrestres, un grupo integrado por unas 900 especies, habitan en la jungla tropical y en los bosques templados, donde encuentran el suelo húmedo propicio. Estos invertebrados han iniciado una invasión que afecta a numerosos puntos del planeta al viajar como polizones en el sustrato de las plantas ornamentales importadas. Pueden no parecer preocupantes ni peligrosas, pero ocupan la cúspide de la cadena alimentaria y depredan con voracidad la fauna edáfica, por lo que su presencia altera el ciclo de nutrientes, pone en peligro especies autóctonas y modifica la comunidad vegetal. Antes de que en Francia se descubriera la presencia de *P. manokwari*, en Europa ya había motivos de alarma: otra planaria invasora, *Arthurdendyus triangulatus*, había causado estragos entre las lombrices de tierra de las islas británicas.

Los ancestros de las planarias colonizaron la tierra firme procedentes del mar o del agua dulce hace cientos de millones de años. La distribución cosmopolita de estos gusanos da buena prueba de su notable capacidad de adaptación a nuevos nichos ecológicos terrestres. Se les conocen muy pocos depredadores y se regeneran si se las corta en dos. Asimismo, se reproducen asexualmente mediante fragmentación: la mitad posterior del cuerpo se separa de la anterior y vaga sin cabeza hasta que le brota una nueva en unos quince días, en tanto que a la mitad delantera le crece una nueva cola.

Hasta hace poco, nadie había prestado atención a este mal conocido grupo de invertebrados, si bien un pequeño colectivo de naturalistas, entre ellos quien escribe, había iniciado su estudio. Los últimos descubrimientos de Justine dieron pie a un aluvión de notificaciones de introducciones de planarias terrestres y han puesto de manifiesto la facilidad con la que estos invertebrados se diseminan y aclimatan a los entornos nuevos. Y, aunque últimamente la invasión parece haberse acelerado y agravado, seguimos sabiendo poco sobre ellos. Ha llegado la hora de que los biólogos desentrañemos la diversidad, la ecología y la historia natural de las planarias terrestres, si queremos entender y limitar las consecuencias ambientales de su propagación.

LA PRIMERA INTRUSA

En nuestra fascinación común por estos platelmintos, Justine y yo seguimos los pasos de un predecesor insigne: Charles Darwin. Durante su periplo en el *Beagle*, a Darwin le sorprendió que un grupo de platelmintos de vida libre, las planarias, o turbelarios, viviera en tierra firme, puesto que la mayoría son propios del agua dulce o salada. Las describe sucinta pero agudamente del modo siguiente:

«Por su aspecto general, estos animales se asemejan a pequeñas babosas, pero con proporciones mucho menores; varias especies tienen líneas longitudinales de color brillante.»

Darwin llevó consigo algunos ejemplares que había hallado en Tasmania a bordo del *Beagle* y se las apañó para mantenerlos con vida un par de meses. Siempre presto a experimentar, cortó algunos en dos y al cabo de 25 días descubrió que cada mitad se había regenerado casi por entero en un individuo. Un año y medio antes había recolectado otros tipos de planarias terrestres en los bosques de la costa chilena. Observador agudo, reparó en que cuando eran sometidas a condiciones adversas (por ejemplo, al ser manipuladas) podían desintegrarse con suma rapidez ante la mirada del observador y convertirse en una masa babosa.

Poco podía sospechar que, 180 años después, se habrían encontrado en Inglaterra planarias terrestres originarias del hemisferio austral. ¿Cómo han alcanzado estos animales de frágil aspecto el hemisferio norte? ¿Y qué podemos hacer para contener su propagación sin freno?

Una pista para responder a la primera pregunta se remonta a 1878, aún en vida de Darwin, año en que se halló una nueva especie tropical de planaria en los invernaderos del Real Jardín Botánico de Kew, en el distrito londinense de Richmond upon Thames. Se la bautizó con acierto como *Bipalium kewense,* por el lugar del descubrimiento. Era evidente que los jardines de Kew constituían una ubicación curiosa, pues la distribución natural del género *Bipalium* abarca la India, el sudeste asiático y Madagascar. En los años siguientes quedó claro que *B. kewense* había colonizado los invernaderos y otros entornos confinados parecidos (viveros de plantas y centros de jardinería), que se hallaban por todo el globo. Y no solo eso, logró naturalizarse en entornos abiertos, como en jardines de California, Luisiana, Florida y las Antillas, entre otros lugares.

En buena medida, el éxito colonizador de *B. kewense* radica en su capacidad de autopropagación por medio de la fragmentación, una forma de reproducción asexual que Darwin ya advirtió en el curso de sus experimentos en el *Beagle*. Todas las especies de *Bipalium* son hermafroditas: están provistas de testículos y ovarios. Pero en las regiones templadas los individuos de *B. kewense* raramente desarrollan el aparato reproductor y, por tanto, son incapaces de multiplicarse por vía sexual. A juzgar por el número de observaciones, ese modo de reproducción parece excepcional en ella.

Casi no transcurre un año en que no se la localice en un lugar nuevo; en 2016 fue descubierta en São Miguel, en el archipiélago de las Azores, y en São Tomé, otra isla sita en el golfo de Guinea. Se supone que *B. kewense* viaja por el mundo aprovechando el comercio hortícola, a bordo de tiestos que contienen plantas tropicales.

Es sabido que en Gran Bretaña existe gran afición a la horticultura. Por eso no resulta sorprendente que, con el tiempo, otras planarias terrestres hayan desembarcado en las islas, ocultas en las macetas con plantas importadas. Desde 1963 se

PÁGINAS ANTERIORES: MYN/GIL WIZEN/NATURE PICTURE LIBRARY



LA DISTRIBUCIÓN DE LA PLANARIA de Nueva Guinea *Platydemus manokwari*, considerada una de las cien especies invasoras más dañinas, demuestra lo lejos que ha llegado desde su hogar, en la isla homónima (*mapa*). Hasta 2014, la invasión se creía limitada a la región del Indo-Pacífico, pero en ese año se descubrió, no sin preocupación, que estaba mucho más extendida (*puntos azules*). Un año después, se verificó que había llegado a otros lugares (*puntos rojos*). *P. manokwari* se alimenta de animales como este caracol mediterráneo (*fotografía*), al que succiona los tejidos a través de la faringe tubular que evagina desde la parte ventral del cuerpo.

FUENTE: J.-L. JUSTINE ET AL., *PEERJ* 3:E1037 (*mapa*); PIERRE GROS, WIKIMEDIA (*caracol y platydemus*)

han registrado en su territorio observaciones de otras especies de planarias procedentes del hemisferio austral, la mayoría seguramente de Nueva Zelanda y de Australia. Al principio casi todas se hallaron en invernaderos, pero en los años ochenta su número comenzó a crecer notablemente y la mayoría de las recién llegadas colonizaron entornos naturales. Una de ellas, la neozelandesa *Arthurdendius triangulatus*, alcanzó incluso las remotas islas Feroe. Hasta la fecha, en el archipiélago británico se han descubierto 15 planarias terrestres exóticas.

Puesto que las introducciones no han cesado, poco sabemos sobre la multitud de efectos ecológicos que puedan provocar. De lo que sí estamos seguros es que no auguran nada bueno.

UNA COMENSAL PROBLEMÁTICA

Las planarias exóticas se propagan con rapidez y sus hábitos de alimentación pueden alterar el equilibrio ecológico y la fauna autóctona. Darwin pensaba que devoraban la madera podrida, pero se equivocaba. Son carnívoros generalistas que depredan a otros invertebrados, como lombrices, caracoles y babosas, o larvas y ejemplares adultos de insectos, como isópodos (cochinillas) o colémbolos. Atacan y apresan víctimas mucho mayores que ellas. Peter Ducey, de la Universidad estatal de Nueva York en Cortland, ha comprobado que *Bipalium adventitium*, introducida en Norteamérica, ataca a lombrices hasta cien veces más pesadas que ella. Para subyugar a su presa recurren a varias artimañas: la simple fuerza física, un moco pegajoso, o una potente secreción digestiva que esparcen sobre la presa viva o que introducen en su interior a través de una faringe extensible. Esta consiste en un tubo musculado que la planaria evagina a través de un orificio alojado en la mitad de la superficie ventral. Unida directamente al intestino, la introduce en la presa y succiona sus tejidos medio digeridos por medio del bombeo peristáltico de la musculatura faríngea.

Recientes trabajos de campo del doctorando Piter Boll, en la Universidad del Valle del Río de los Sinos, en Brasil, han revelado la existencia de planarias terrestres especializadas en devorar otras congéneres. La víctima reconoce de inmediato el peligro y, cuando es tocada por la cazadora o se tropieza con el rastro de baba dejado por ella, intenta huir frenéticamente. En algunos casos, incluso, una especie de planaria caza a otra y, esta, a su vez, a una tercera.

Una de las mayores amenazas que entrañan las invasoras es la depredación de las lombrices de tierra autóctonas, que mantienen la esponjosidad del suelo. La planaria australiana *Australoplana sanguinea* se alimenta en exclusiva de lombrices, por lo que hay sobrados motivos para preocuparse por el perjuicio que podría causar en las poblaciones de lombrices que habitan en los campos de cultivo del Reino Unido. El edafólogo Daniel Dindal, de la Universidad estatal de Nueva York, ya demostró en 1970 que *B. adventitium* se había convertido en una plaga en Norteamérica a causa de los estragos en las granjas de lombricultura.

Estudios más recientes de Ducey sobre la distribución y la actividad depredadora de *B. adventitium* han revelado que

abunda sobre todo en los alrededores de los jardines con plantas ornamentales exóticas y trasplantadas, donde se alimenta de una variada gama de lombrices. En Norteamérica alguien podría aducir que la erradicación o, cuanto menos, la reducción del número de lombrices no es motivo de gran preocupación, puesto que estas son también intrusas. En el norte de Estados Unidos y en Canadá todas ellas desaparecieron durante la última glaciación, que acabó hace unos 12.000 años. Regresaron al Nuevo Mundo con los colonos europeos primero y con los cebos de pesca después, y desde entonces se han diseminado a lo largo de los caminos y a partir de los núcleos habitados. En este momento, hasta el 30 por ciento de las lombrices norteamericanas son foráneas. Muchas personas y entidades del norte del subcontinente intentan frenar su dispersión. En su empresa, las planarias probablemente serán un aliado inesperado. Pero las lombrices autóctonas que permanecen en el sur de Estados Unidos pueden resultar afectadas por estos depredadores desconocidos. Tal vez ciertas recién llegadas, como *Bipalium pennsylvanicum* y *B. adventitium*, sean bienvenidas en la lucha contra las lombrices exóticas en Norteamérica, pero otra planaria terrestre que ha desembarcado allí, *Bipalium vagum*, prefiere los moluscos. Así que Ducey cree que podría diezmar los caracoles autóctonos raros, aunque tales efectos no han sido estudiados en profundidad.

Más allá de Norteamérica, los ecólogos han descubierto otros efectos perjudiciales de las planarias invasoras en los ecosistemas de acogida. En varios estudios publicados entre 1989 y 1995, Rod Blackshaw, entonces en el Departamento de Agricultura de Irlanda del Norte, halló que la planaria neozelandesa *A. triangulatus* empobrecía la densidad y la diversidad de las lombrices presentes en los campos de Irlanda del Norte. Esa fue una de las razones por las que Hugh Jones, entonces en la Universidad de Manchester, y sus colaboradores hicieron en 1995 un llamamiento a escala nacional para que los jardineros y aficionados las buscasen bajo los pavimentos empedrados, los entarimados, los troncos caídos o los sacos de plástico. La respuesta de 318 personas reveló que esas planarias provenientes de Australia y Nueva Zelanda habían infestado grandes áreas de las islas británicas. También quedó claro que su propagación era consecuencia de las actividades de jardinería, en concreto, el trasiego de plantas en maceta de acá para allá.

PLANARIAS INVASORAS

ESPECIE	NOMBRE VULGAR	ORIGEN	ÁREA DE INTRODUCCIÓN
Arthurdendyus triangulatus	Planaria neozelandesa	Nueva Zelanda	Islas Feroe, Irlanda y Reino Unido
Artioposthia exulans		Nueva Zelanda	Reino Unido
Australoplana sanguinea	Planaria australiana	Australia	Reino Unido
Bipalium adventitium		Desconocido	EE.UU.
Bipalium kewense		Indochina	Cosmopolita
Bipalium multilineatum		Japón	Francia, Italia, y tal vez Corea del Sur
Bipalium pennsylvanicum		Desconocido	EE.UU.
Bipalium vagum		Desconocido	Islas Bermudas y EE.UU.
Caenoplana bicolor		Australia	Italia, España, Países Bajos y Reino Unido
Caenoplana coerulea	Planaria azul de jardín australiana	Australia	Argentina, Francia, Nueva Zelanda, Islas Norfolk, España, Reino Unido y EE.UU.
Dolichoplana striata		Indomalasia	España, Reino Unido y EE.UU.
Kontikia andersoni		Nueva Zelanda	Reino Unido
Marionfyfea sp.		Nueva Zelanda	Francia, Países Bajos y Reino Unido
Obama nungara		Brasil	Francia, Guernesey, Italia, España y Reino Unido
Parakontikia ventrolineata		Australia	Francia, Irlanda, México, Nueva Zelanda, Sudáfrica, Reino Unido y EE.UU.
Platydemus manokwari	Planaria de Nueva Guinea	Nueva Guinea	Francia, Japón, Nueva Caledonia, Puerto Rico, Singapur, Filipinas, Tahití, Maldivas, Islas Salomón, EE.UU. y otras islas del Pacífico sudoriental

ESTAS PLANARIAS TERRESTRES se han diseminado desde su lugar de origen a distintos puntos del planeta. Entre ellas figuran algunas de las especies invasoras más perjudiciales.

SIGMA XI/AMERICAN SCIENTIST

LOS PRIMEROS HALLAZGOS DE PLANARIAS

El esfuerzo por conocer el alcance y dar respuestas al problema de las planarias invasoras dio comienzo en 1998, con un seminario internacional sobre estos invertebrados patrocinado por la OCDE. El encuentro tuvo lugar en Nueva Zelanda, en la Universidad de Canterbury en Christchurch. Este país destaca por ser uno de los dotados con mayor diversidad de planarias terrestres y es el origen de algunas de las introducidas en las islas británicas.

Se conocen ya unas 86 planarias terrestres neozelandesas y muchas más aguardan su descripción. En el seminario se estimó que el total superaba el centenar, una cifra que empequeñece las contadas especies europeas y norteamericanas. Desde esa perspectiva, cabe esperar más introducciones procedentes de Nueva Zelanda, un hecho que instó a que Brian Boag, del Instituto Esco-

cés de Investigación Agronómica de Dundee, en un artículo calificara tales invasiones como una «venganza colonial».

Aparte de estimar el número de especies que aún quedaban por descubrir y el de introducciones, los participantes revelaron otras lagunas en el conocimiento de las planarias terrestres y sugirieron métodos para la detección y el control de las especies introducidas. A finales de ese año apareció un sumario del simposio que el tiempo ha convertido en una publicación de referencia sobre las planarias terrestres, en general, y las invasoras, en particular.

Algunos de los asistentes británicos, entre ellos Boag y Jones (este último ahora en el Museo de Historia Natural de Londres), siguen estudiando las invasiones y sus consecuencias para las islas británicas. Por desgracia, el reducido número de expertos en activo hizo que las iniciativas destinadas a documentar y gestionar las invasiones en todo el mundo fueran a menos tras el seminario de 1998.



LA MAYOR PLANARIA TERRESTRE de Sudamérica, *Obama eudoximariae*, de la selva de Río de Janeiro, puede alcanzar los 20 centímetros de longitud, aunque la mayoría de las planarias terrestres apenas supera escasos centímetros.

Poco se ha hecho fuera del Reino Unido, probablemente debido a la escasez de especialistas y a que, de momento, el número de planarias exóticas conocidas es también limitado. En la década de los noventa, las que se habían hallado en suelo europeo se contaban con los dedos de la mano, seguramente importadas de modo accidental por los horticultores decimonónicos con plantas de maceta. Se trataba de *B. kewense* y de la indomalaya *Dolichoplana striata*, descrita por vez primera en Norteamérica en 1943. Tres años antes se citaba *Parakontikia ventrolineata* en Texas, donde llegó en partidas de flores procedentes de México. No hay duda de que esta especie australiana no formaba parte de la fauna norteamericana; ahora medra en los jardines de California. Y la también australiana *Caenoplana coerulea* habita hoy en los de Florida, Georgia y California, donde convive a menudo con *P. ventrolineata*.

Antes del seminario, los biólogos sabíamos que *B. kewense* había colonizado muchos lugares de Norteamérica, donde se la puede hallar en espacios abiertos hasta la latitud de Carolina del Norte. Otros tres miembros exóticos de *Bipalium* presentes en Estados Unidos son *B. adventitium* (en 12 estados), *B. pennsylvanicum* (hasta el momento solo en Pensilvania) y *B. vagum* (en Florida, Texas y las islas Bermudas).

Son tan pocas las especies conocidas que han sido introducidas fuera del Reino Unido que pocos se dedican a buscarlas y menos aún se preocupan por evitar su propagación.

NUEVAS INTRODUCCIONES

Ante el creciente número de comunicados sobre planarias terrestres introducidas, nuevos investigadores se han interesado por ellas, como Justine, descubridor de la llegada de la planaria de Nueva Guinea a dos continentes, Europa y Norteamérica. El aluvión de nuevos registros sobre planarias foráneas en Europa comenzó en 2014, con los informes de Justine sobre la presencia en Francia de la planaria azul de jardín australiana (*C. coerulea*) a la que siguió otra de Nueva Guinea, *P. manokwari*. El hallazgo de esta última desató especial alarma entre los ecólogos. Con 45 milímetros de longitud (70 como máximo) y unos cinco de grosor, su presunto lugar de origen es Nueva Guinea, aunque hoy presenta una distribución más amplia en la región indo-pacífica. Se ha extendido por accidente en numerosas islas, como Guam, Palau, Hawái, Micronesia, Polinesia francesa, Samoa, Rotuma, sin olvidar la isla-continente de Australia, probablemente a través del comercio hortícola.

En otros puntos del Pacífico (Bugsuk, en Filipinas, Yokohama, en Japón, y Maldivas) ha sido introducida deliberadamente para controlar otro invasor conflictivo: el caracol gigante africano (*Achatina fulica*). Este gasterópodo de África oriental había sido introducido, a su vez, en numerosas regiones del globo como recurso alimenticio, como especie ornamental o por accidente. Devora todo tipo de vegetales, por lo que desplaza las especies endémicas y raras de caracoles que solo habitan en remotas



ALGUNAS PLANARIAS TERRESTRES no solo se alimentan de invertebrados del suelo, sino también de otras planarias. En la imagen, una planaria neotropical, *Paraba multicolor*, engulle un ejemplar de *Endeavouria septemlineata*, propia de Hawái y Brasil. La flecha señala la faringe, el tubo que la planaria evagina para devorar a sus presas.

FERNANDO CARBAYO (O. eudoximariae); PITER BOLL (P. multicolor)

Planarias exóticas en España

De curiosos gusanos introducidos en los jardines a invasoras de ecosistemas y cultivos

MARTA RIUTORT, MARTA ÁLVAREZ-PRESAS Y EDUARDO MATEOS

Las planarias terrestres de ambientes secos como la región mediterránea constituyen un buen indicador de los cambios en la biodiversidad. Son organismos muy sensibles a la desecación y, a la vez, su capacidad de dispersión es muy lenta, de modo que su distribución está muy influenciada por la existencia de un entorno adecuado (bosque con suelos húmedos) y por la historia climática y geológica de la zona. En nuestro grupo de investigación, centrado en estudiar cómo se origina y se mantiene la biodiversidad de una región, utilizamos como organismo modelo las planarias. Las especies terrestres autóctonas, la mayoría pertenecientes al género *Microplana*, suelen ser de tamaño reducido (entre unos pocos milímetros y tres centímetros), tienen el cuerpo cilíndrico y sus colores son apagados.

A raíz de esta línea de investigación, nos interesamos también por aquellas planarias que viven fuera de su área habitual de distribución, presuntamente introducidas en nuestra región como consecuencia de las actividades humanas. Este factor nos preocupa, ya que puede tener consecuencias en la composición de nuestra fauna y flora y también en la agricultura.

En España, la primera planaria terrestre exótica se detectó en un jardín de la provincia de Barcelona en el año 1983. Se trataba de *Bipalium kewense*, originaria de Vietnam y Camboya. Sin embargo, no fue hasta la primera década del siglo XXI cuando comenzó a detectarse un preocupante incremento de la presencia de especies introducidas en jardines de diversas localidades de nuestro país. El hecho de que la mayoría de los hallazgos se realizasen en jardines públicos o privados nos llevó a intentar localizar su origen en centros de jardinería y viveros de plantas. Nuestra visita a numerosas de estas instalaciones nos dio la razón: muchas de ellas se hallaban infestadas de planarias terrestres no autóctonas. Las encontramos fácilmente debajo de las macetas de los invernaderos o incluso en la tierra de aquellas plantas que estaban preparadas para su venta al público, lo que explica su abundancia en jardines privados y públicos.

En total hemos determinado la presencia de al menos diez especies de planarias terrestres introducidas. La identificación clásica de las especies en este grupo depende de las características de su aparato reproductor, lo que implica un tedioso trabajo de obtención de cortes histológicos y reconstrucción de su anatomía interna. Además, los individuos jóvenes y las especies de reproducción asexual carecen de ese órgano. Por suerte, hoy contamos con una técnica denominada código de barras de ADN que facilita la identificación [*véase* «El código de barras de la vida», por Mark Y. Stoeckle y Paul D. N. Hebert; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2008]. Consiste en comparar las secuencias del ADN de los especímenes encontrados con las de ejemplares de diferentes especies conocidas de otros países. A continuación se reconstruye el árbol filogenético, lo que hace posible determinar las relaciones de parentesco evolutivo entre ellas e identificar a qué especie pertenecen los nuevos individuos.

Posibles riesgos

¿Son las nuevas especies un peligro para nuestros ecosistemas o la fauna local? Como hemos dicho antes, la mayoría de los ejemplares se hallan en espacios restringidos, como jardines particulares, centros de jardinería o viveros de plantas. Ello es así probablemente porque sus necesidades de humedad y temperatura no les permiten desarrollarse con facilidad en nuestro paisaje natural, mucho más seco que sus áreas de origen, mayoritariamente tropicales.

Así pues, de entrada podríamos pensar que no supondrán ningún peligro para nuestros hábitats. Sin embargo, tres de las diez especies introducidas en España, a saber, *Caenoplana coerulea*, *Kontikia ventrolineata* y *Rhynchodemus* sp., fueron halladas en lugares distintos de los espacios cerrados donde suelen observarse. En concreto, se identificaron en el talud de una carretera y en una zona protegida restaurada. Estas localidades están en contacto directo con espacios agrícolas o forestales, y en ellas se habían realizado diversos tratamientos que conllevaron movimientos de tierras y plantaciones de especies vegetales autóctonas. Estas últimas procedían de viveros, lo que nos indica la fuente más probable de la infestación. El caso descrito nos lleva, por lo tanto, a llamar la atención sobre la necesidad de proceder de forma extremadamente cautelosa durante las restauraciones del paisaje.

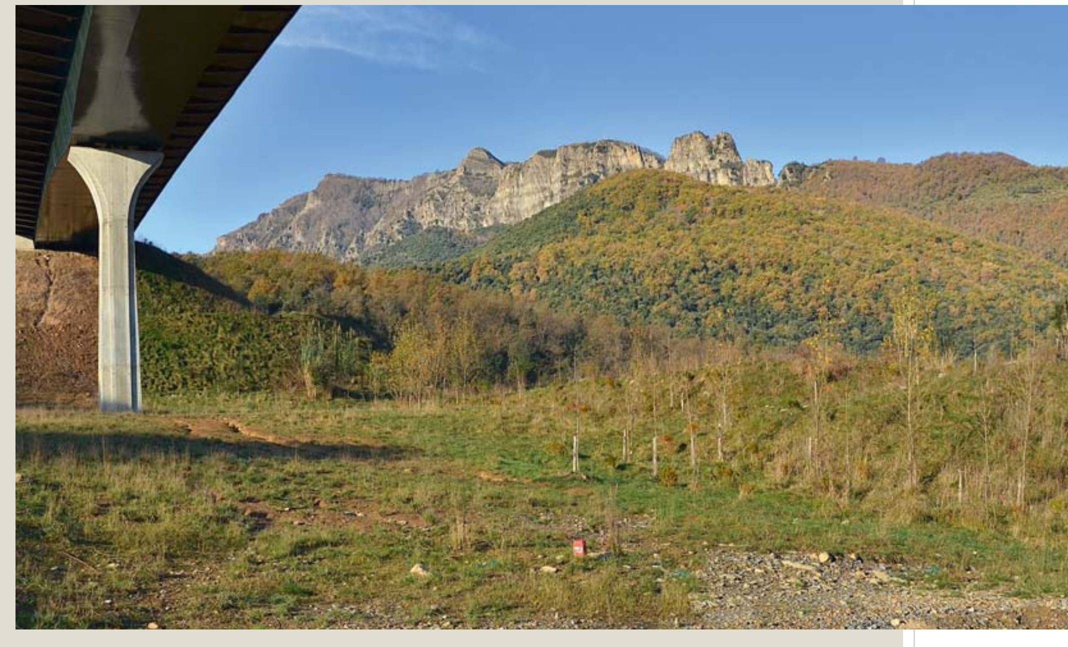
islas del Pacífico. El hecho de que la planaria de Nueva Guinea se alimente del caracol gigante africano puede ser motivo de alegría allí donde convivan ambos. Sin embargo, la planaria no hace distinciones: el caracol puede ser ese o uno endémico. Lo cierto es que hasta ahora no ha acabado con el invasor, pero sí ha provocado el declive de los caracoles autóctonos.

El descubrimiento de *P. manokwari* en Francia, muy lejos de su hogar en el Indo-Pacífico, desató un interés mundial. Comenzaron a afluir noticias sobre nuevos hallazgos de la especie. Resulta que esta intrusa ha aparecido también en Singapur, Nueva Caledonia y las islas Salomón, entre otros lugares. No hay duda de que estos nuevos hallazgos quedan circunscritos en los límites del Indo-Pacífico, pero también se ha encontrado fuera de ellos, en Florida y Puerto Rico. En Francia, *Platydemus* solo ha sido descubierta en un invernadero, pero campa libre en Singapur, Nueva Caledonia, Florida y las islas Salomón.

En los dos últimos años el continente europeo ha ido a la zaga del Reino Unido, pues no han cesado los nuevos hallazgos de especies introducidas. Algunas de las descubiertas en el Reino Unido, como *P. ventrolineata* y *D. striata*, se han detectado ahora en España, y la primera de ellas se ha observado también en Francia. La planaria azul de jardín, *C. coerulea*, otra colonizadora de las islas británicas, no solo ha sido descubierta en el país galo, sino también en España. Otra especie del género, *Caenoplana bicolor*, ha sido vista en Italia, Holanda y, de nuevo, España. Y *B. kewense,* esa gran viajera cosmopolita, disfruta ahora en Europa de la compañía de *Bipalium multilineatum*, especie oriunda de Japón que se ha instalado en Francia e Italia.

Las tres especies detectadas en espacios abiertos presentan, además, una característica que las hace susceptibles de convertirse en especies invasoras: las tres corresponden a depredadores generalistas, es decir, se alimentan de un amplio espectro de animales del suelo, como lombrices, caracoles e insectos. A diferencia de los depredadores especialistas (que se nutren solo de una o unas pocas especies), tienen el sustento garantizado en casi cualquier hábitat, lo que explicaría su éxito fuera de los viveros y los jardines.

Pero ¿pueden estos animales suponer una amenaza en nuestro país, como ha ocurrido en Inglaterra o Estados Unidos? Hemos realizado un estudio de la distribución potencial de una de estas especies (*C. coerulea*) en la península ibérica. La hemos estimado teniendo en cuenta las condiciones climáticas óptimas para su presencia a partir del conocimiento de sus localidades de distribución en su área natural, Australia. El resultado es que, a excepción de las áreas más secas de la península, gran parte del territorio peninsular, y especialmente el norte, resulta apto para esta especie. Por consiguiente, las condiciones climáticas (temperatura y humedad fundamentalmente), así como la disponibilidad de alimento, son adecuadas para su subsistencia en las zonas contiguas a aquellas donde se ha encontrado. Todo ello nos hace pensar que, si no existen otros factores limitantes, solo es cuestión de tiempo que estas planarias exóticas se instalen en nuestro medio de forma permanente.



En esta plantación (*primer plano*) de un talud de carretera cerca del túnel de Bracons, en Gerona, se han hallado ejemplares de la especie exótica *Caenoplana coerulea*. La planaria, que seguramente llegó junto con las plantas de vivero plantadas, podría propagarse e invadir los bosques húmedos de la zona (*segundo plano*).

ENRIC SAUQUÉ

Es difícil prever las consecuencias que ello pueda tener. Podrían competir con las especies autóctonas de planarias, aunque estas son mucho más pequeñas y posiblemente no se nutran de los mismos organismos. Pero, sobre todo, podrían competir con pájaros y pequeños mamíferos, ya que, al igual que ellos, se alimentan de lombrices de tierra y caracoles. Y, como ha ocurrido en otros países, pueden representar un problema para la agricultura: al eliminar las poblaciones de lombrices, estas dejan de perforar los suelos y de airearlos, por lo que las raíces de las plantas dejan de crecer bien.

Así pues, las planarias exóticas han hecho notar también su presencia en España, tanto en lo que respecta al número de especies introducidas como a la abundancia de ejemplares. Aunque de momento las hallamos mayoritariamente en espacios con ambientes controlados por el hombre, es previsible que en un futuro próximo algunas de las especies se expandan hacia áreas naturales y zonas de cultivo, con lo que se convertirán en especies invasoras que podrían acarrear notables daños económicos y ambientales.

Marta Riutort *es profesora del departamento de genética, microbiología y estadística de la Universidad de Barcelona e investigadora del Instituto de Investigación de la Biodiversidad de la misma universidad.* ***Marta Álvarez-Presas*** *es investigadora de ambos centros.* ***Eduardo Mateos*** *es profesor del departamento de biología evolutiva, medioambiente y ecología de la mencionada universidad.*

Uno puede sentirse inclinado a pensar que ese auge de las observaciones de planarias exóticas es fruto de la mejora en la comunicación entre los naturalistas gracias a Internet o a la participación de los aficionados. Ambos factores pueden explicar en parte ese aumento, pero los especialistas creemos que no lo explican plenamente. Pensamos que la creciente velocidad y magnitud de los desplazamientos que comporta la globalización ha acelerado la dispersión de estos platelmintos en los últimos años.

Las últimas invasiones no las protagonizan solo especies conocidas, sino que pueden corresponder a especies nuevas para la ciencia. Durante el 12.º Simposio Internacional sobre la Biología de los Platelmintos celebrado en Estocolmo en 2012, Jones y yo convenimos en que habíamos descubierto en el Reino Unido y los Países Bajos, respectivamente, especímenes de una planaria cuyo aspecto externo era muy similar. Así que decidimos aunar fuerzas y averiguar a qué especie podían pertenecer. El examen microscópico dejó claro que los ejemplares de Jones y los míos eran idénticos. Pero también quedó patente que no podían ser asignados a ninguna especie conocida para la ciencia. Resultó que pertenecían al género *Marionfyfea*, el nombre que Leigh Winsor, de la Universidad James Cook de Australia, acuñó para una planaria terrestre procedente de la isla Campbell, en las aguas que separan Nueva Zelanda de la Antártida. (El nombre genérico reconoce la labor de la zoóloga Marion Fyfe sobre las planarias terrestres neozelandesas.) Así que, en lo referente al origen de esta nueva especie introducida de *Marionfyfea*, todo lo que podemos decir es que tal vez tenga



Algunas planarias lucen colores vistosos, como esta *Bipalium* del sudeste de Asia. Otras son más crípticas y difíciles de ver, pero los rincones húmedos y sombríos de los invernaderos y los jardines son un buen lugar donde empezar a buscar.

JASON BAZZANO/ALAMY STOCK PHOTO

¿Qué hago si encuentro una planaria en mi jardín?

Si descubre un gusano cuyo aspecto le recuerda el de una planaria exótica, le aconsejo que haga lo siguiente. En primer lugar, tome una fotografía (preferiblemente junto a un objeto de dimensiones conocidas, como una moneda o similar) y cuélguela en un portal pertinente, como iNaturalist (www.inaturalist.org), junto con la información sobre la localización exacta y la fecha de la observación. En muchos países hay otros portales donde puede publicar observaciones naturalistas. [En España, póngase en contacto con el equipo de investigación de la Universidad de Barcelona, coordinado por Marta Riutort y Eduardo Mateos, que está estudiando la propagación de estas especies invasoras en la península ibérica. Puede hacerlo bien por correo electrónico (caenoplanacoerulea@gmail.com), o bien por red social (www.facebook.com/caenoplana.coerulea).] A continuación, sería conveniente que contactara con las autoridades ambientales del país donde ha encontrado la planaria para hacerles partícipes de su hallazgo.

Por último, puede resultar útil recoger uno o varios ejemplares para su estudio, puesto que su apariencia externa puede ser equívoca. La mejor forma consiste en recoger la planaria con un pincel blando o con una hoja para depositarla después en un recipiente. Cuando recupere la forma y esté bien estirada, vierta agua hirviendo sobre ella. Esto la matará inmediatamente y reducirá el contorneo. Acto seguido, introdúzcala en un tubo o en un frasco pequeño con cierre hermético que contenga alcohol absoluto (si no dispone de él, use alcohol sanitario o alcohol isopropílico). Coloque una etiqueta *dentro* del tubo, escrita a lápiz, donde figure la fecha, el lugar y la persona que la ha recolectado.

su origen en algún lugar de Nueva Zelanda. Entender la naturaleza de la invasión no es sencillo, pues aún carecemos de un retrato completo de los taxones de planarias, y a menudo los invasores aparecen antes de que se sepa su procedencia o los pormenores de su ecología.

Todas esas nuevas especies naturalizadas en Europa provienen de Oriente (sudeste asiático, Australia o Nueva Zelanda). Pero no sucede así con una planaria del género *Obama*, recientemente descubierta en Gran Bretaña, España, Francia e Italia. El nombre del género no es un homenaje al presidente de Estados Unidos, como pudiera pensarse. Procede de dos palabras de la lengua tupi, que hablaba la tribu homónima de Brasil: *oba* significa «hoja» y *ma* «animal». El género es originario de ese país e incluye la mayor planaria terrestre sudamericana: la impresionante y vistosa *Obama eudoximariae,* que llega a alcanzar los 29 centímetros.

La propagación de una especie nueva podría pasar inadvertida si esta guardara un gran parecido con otra. De ello se deduce que la apariencia externa a menudo no aporta suficiente información para determinar con fiabilidad su identidad. El hallazgo de una especie de *Obama* en Europa ejemplifica el hecho de que el aspecto de las planarias puede ser engañoso. En un principio, los ejemplares europeos se adscribieron a *Obama marmorata*, una especie brasileña. Pero el estudio de su anatomía microscópica y su dotación genética reveló que los especímenes no solo diferían de *O. marmorata*, sino de las demás especies de *Obama*. Pero eso no es todo. La nueva especie ha sido hallada en Brasil, donde posiblemente convive con *O. marmorata*. Bautizada con el nombre de *Obama nungara*, tanto en Europa como en Brasil pulula en ambientes humanizados, como parques, centros de jardinería, viveros vegetales, granjas de lombrices, terrenos herbosos y tiestos con plantas ornamentales.

La mayoría de esos hallazgos recientes de planarias exóticas en Europa proceden de lugares situados al aire libre, como jardines y huertos. Hasta el momento algunas solo se han descrito en viveros, pero no es razón para pensar que no hayan podido dispersarse. Todo lo que sabemos sobre su adaptabilidad y facilidad de transporte apunta a que a la larga muchas se naturalizarán y lo harán en una zona mucho más vasta, por la acción humana. Y eso es exactamente lo que está sucediendo ahora mismo en el Reino Unido con la neozelandesa *A. triangulatus* y la australiana *A. sanguinea*.

MEDIDAS DE CONTROL

Es esencial adoptar medidas de control que pongan freno a la diseminación de las planarias terrestres, pero son tan prolíficas, adaptables, discretas y poco conocidas que la contención será sumamente difícil. La invasión podría tener efectos nocivos e impredecibles para la flora y la fauna autóctonas. Pero hasta la fecha, muchos países no han elaborado una legislación clara o rigurosa destinada a prevenir las introducciones de estos invertebrados. Las medidas más adecuadas para evitar su propagación las han planteado organismos privados y públicos de Europa, como los departamentos gubernamentales responsables de la agricultura en Irlanda del Norte, País de Gales y Reino Unido en su conjunto; Dove Associates, una empresa de asesoría hortícola británica; y la Organización Europea y Mediterránea para la Protección de las Plantas (EPPO, por sus siglas en inglés).

En el caso de algunas que ya han colonizado el medio natural, como la planaria de Nueva Guinea, se desconocen los métodos de control biológico, aunque probablemente no existan, pues se trata de depredadores situados en la cúspide alimentaria que tienen poco que temer de otros carnívoros del ecosistema edáfico. En otras palabras, en condiciones naturales no hay, o apenas hay, animales que se alimenten de planarias. Ello se explica en parte por su sabor repugnante, algo acreditado por Winsor. Este zoólogo ha dedicado su vida al estudio de las especies australianas y no ha dudado en recabar esa información arcana en un artículo, donde ha calificado el sabor de *Platydemus* de «astringente».

Varios expertos en platelmintos ya se han pronunciado o han estudiado la viabilidad de la aplicación de medidas fitosanitarias a las plantas importadas para matar las planarias e impedir su propagación a través del sustrato de las macetas. La inmersión de los tiestos en agua caliente a 34 grados centígrados durante un mínimo de cinco minutos (con el cepellón de la planta previamente envuelto en una bolsa de plástico) es plenamente eficaz y mata en menos de una hora todos los individuos de planaria neozelandesa. Métodos sencillos parecidos, como calentar el suelo, podrían ser igual de eficaces para frenar su dispersión. La planaria de Nueva Guinea parece ser más tenaz y solo muere si se sumerge cinco minutos en agua caliente a por lo menos 43 grados, tal y como describió en 2008 Shinji Sugiura, entonces en el Instituto nipón de Investigaciones y Productos Forestales. Las planarias muestran predilección por los rincones húmedos y oscuros, por lo que se les podría dar caza en las jardinerías y los viveros, o en nuestro jardín, bajo objetos como pedazos sueltos de césped, macetas, piedras o plástico opaco depositado sobre el suelo.

Varios países han elaborado leyes y normativas para el control de las especies invasoras dañinas, pero la mayoría de ellas no hacen referencia a las planarias terrestres. Esos reglamentos son importantes porque el problema con las especies invasoras es que nunca se sabe cuál de ellas provocará una catástrofe y causará graves perjuicios económicos o la extinción de especies autóctonas.

En el Reino Unido, la Ley de Vida Silvestre y Medio Natural prohíbe la distribución deliberada de *A. triangulatus*, *A. sanguinea*, *Kontikia andersoni* y *P. ventrolineata*. En otros países, las medidas de control aconsejadas, como la norma de la EPPO para *A. triangulatus*, son meras directrices y consejos que aún no han dado lugar a ninguna legislación de la Unión Europea. Y si bien el Reglamento de la UE sobre Especies Exóticas Invasoras entró en vigor el 1 de enero de 2015 y se ha elaborado una relación de dichas especies, en ella no figura ninguna planaria terrestre.

En Australia, la flamante Ley de Seguridad Biológica y sus reglamentos entraron en vigor el 16 de junio de 2016. Uno de sus propósitos es controlar la circulación de plantas y animales, pero de nuevo no señala a ninguna planaria terrestre como objetivo prioritario. La legislación en la vecina Nueva Zelanda es similar.

Estados Unidos cuenta con un corpus de leyes que regula el transporte de animales y plantas bajo la jurisdicción del Servicio de Inspección Fitosanitaria y Veterinaria (APHIS), dependiente del Departamento de Agricultura. Por su parte, cada estado del país posee su propio reglamento referente a la importación y el transporte de fauna y flora. El Código de Reglamentos Federales no cita explícitamente las planarias, pero un representante de APHIS me remarcó en un correo electrónico que, pese a ello, el servicio considera las planarias un depredador general que está sujeto a su regulación de control de agentes biológicos. Este portavoz también señaló que pueden ser consideradas indirectamente como una plaga vegetal porque devoran las lombrices.

Las invasiones biológicas uniformizan la biodiversidad del planeta. A los aficionados a las planarias tal vez les entusiasme hallar especies exóticas cerca de casa, pero todos preferiríamos verlas confinadas en su entorno natural. La aplicación de medidas fitosanitarias a las plantas importadas evita o reduce la diseminación de las planarias exóticas, pero la escasa inspección a que se someten las importaciones europeas y el comercio sin restricciones en su seno traerán inevitablemente consigo más especies foráneas. Por bien que más países incluyan a las planarias invasoras en sus listados de cuarentena y su legislación, el cumplimiento se vislumbra difícil, como sucede en el Reino Unido, donde la observancia de la normativa resulta desigual. Así pues, siendo realistas, como mucho podremos ralentizar las nuevas introducciones y contener las especies que ya nos han invadido.

Así que, junto con colegas de todo el mundo, seguiremos estrechando la vigilancia ante nuevos turbelarios invasores. A inicios de 2016 se descubrió en el Reino Unido otra nueva intrusa procedente de Nueva Zelanda, *Artioposthia exulans*, prueba de que aún no hemos visto al último de estos invasores. IyC

PARA SABER MÁS

The invasive New Guinea flatworm *Platydemus manokwari* in France, the first record for Europe: Time for action is now. J.-L. Justine et al. en *PeerJ*, vol. 2, pág. e297, 2014.

Diversity of introduced terrestrial flatworms in the Iberian Peninsula: A cautionary tale. M. Álvarez-Presas et al. en *PeerJ*, vol. 2, pág. e430, 2014.

Planarias terrestres introducidas en España. E. Mateos, M. Álvarez-Presas y M. Riutort en *Quercus*, Cuaderno 353, 40-48, 2015.

The true identity of *Obama* (Platyhelminthes: Geoplanidae) flatworm spreading across Europe. F. Carbayo et al. en *Zoological Journal of the Linnean Society*, vol. 177, págs. 5-28, 2016.

A new terrestrial planarian species of the genus *Marionfyfea* (Platyhelminthes, Tricladida) found in Europe. H. D. Jones y R. Sluys en *Journal of Natural History*, vol. 50, n.º 41-42, págs. 2673-2690, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Especies invasoras. Robert Barbault y Anne Teyssèdre, en «Conservación de la biodiversidad», colección *Temas* de *IyC* n.º 61, 2010.

por H. Joachim Schlichting

H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.



Física de las telarañas

La seda de estos arácnidos debe algunas de sus asombrosas propiedades a un revestimiento líquido. Este ayuda a preservar la estructura de la telaraña y, al mismo tiempo, contribuye a tensar los hilos

Las telas de araña pueden provocar reacciones opuestas. En ocasiones, sus pegajosos hilos nos causan repugnancia, como cuando descubrimos grandes nidos de polvo en las esquinas de una habitación o cuando se nos quedan enganchados al tocarlos. En otras, en cambio, la estética de una telaraña circular perfectamente tensada puede resultar cautivadora. Así ocurre cuando las vemos cubiertas de rocío o cuando despliegan un iridiscente juego de colores a la luz del sol.

Hace decenios que los científicos se interesan por este sorprendente material. ¿Qué lo hace tan elástico y, al mismo tiempo, tan estable? Hay dos razones por las que resulta tan difícil quitar las telarañas: son pegajosas y muy extensibles. Como veremos, ambas propiedades se encuentran estrechamente relacionadas.

Collares de perlas microscópicos

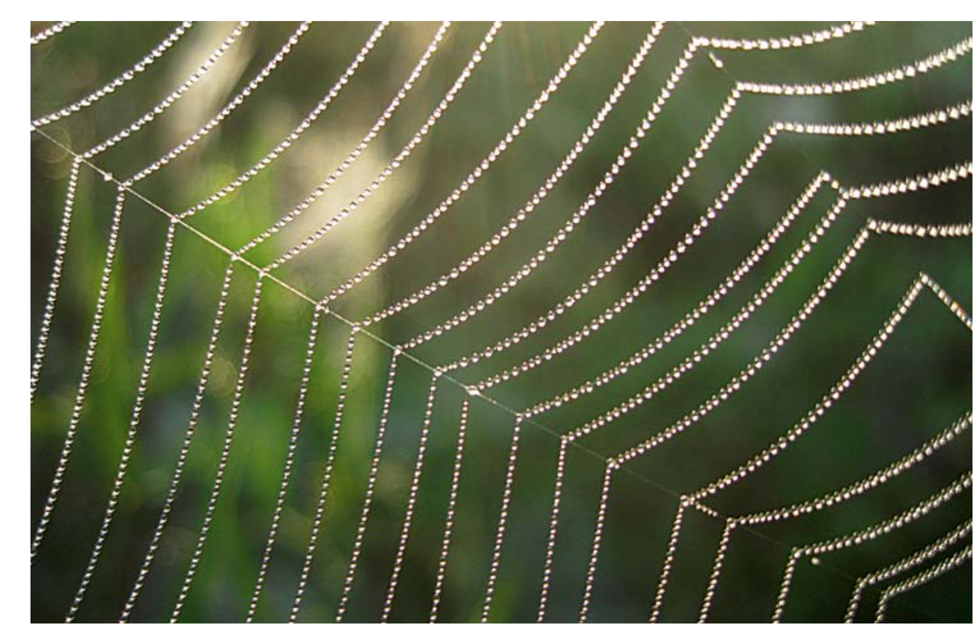
Las arañas construyen su tela a partir de una solución (secreción de espidroína, una especie de cristal líquido) que expulsan de su abdomen. En contacto con el aire, la mezcla se solidifica de inmediato y da lugar a una fibra extraordinariamente resistente. Las arañas pueden producir diferentes tipos de hilo en función del uso que vayan a darle. Para la estructura básica de la tela, numerosas especies, como la araña de jardín europea, tejen hilos radiales. Estos son muy rígidos y enseguida se comban si acercamos sus extremos, aunque solo sea en un pequeño porcentaje.

Sobre esta estructura radial, la araña fija a continuación una espiral fabricada con un «hilo de captura». Al contrario que los primeros, este seguirá estando tenso incluso si lo contraemos hasta un 5 por ciento de su longitud original. Esta propiedad resulta óptima para capturar presas, ya que incluso aquellos insectos que choquen contra la telaraña a gran velocidad solo la deformarán, en lugar de romperla. Por otro lado, que no resbalen por la malla ni sean catapultados en sentido opuesto, como en una cama elástica, se debe a otra importante característica de los hilos de captura: se hallan cubiertos de diminutas gotitas adhesivas, las cuales retienen cruelmente a la presa y evitan que escape. Esos puntos adhesivos se distribuyen a lo largo del hilo a intervalos muy regulares, como las perlas de un collar. Sin embargo, no es la araña la que debe encargarse de disponerlos de esa forma: el ribete de gotitas se crea de manera espontánea por pura necesidad física.

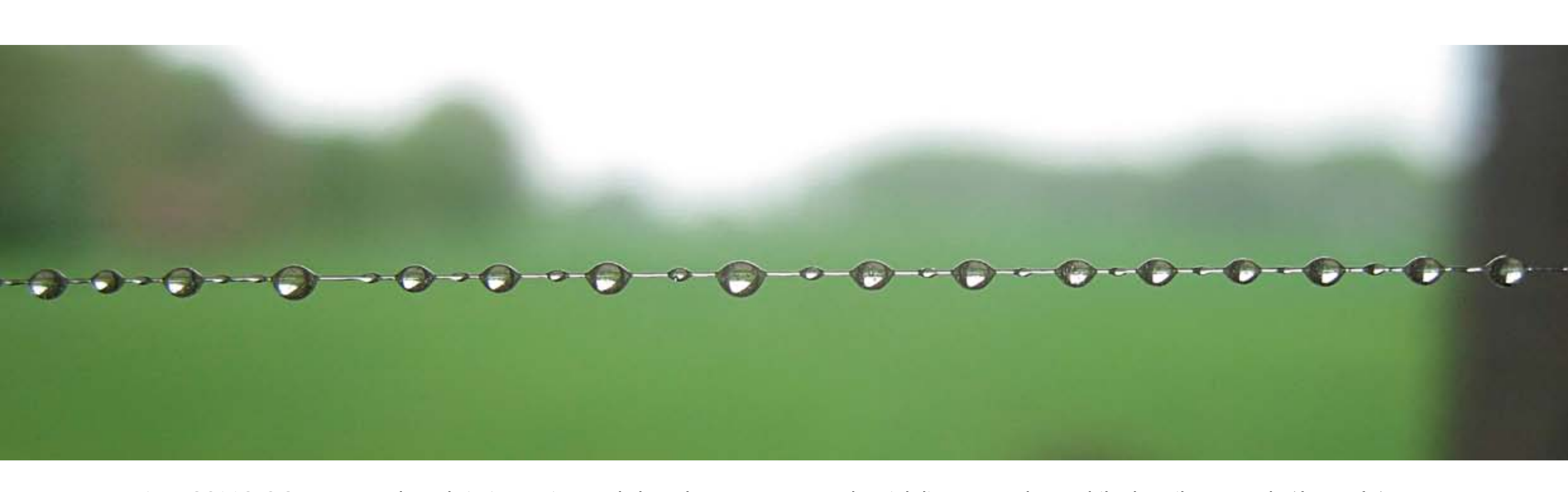
La araña expele el hilo de captura por el abdomen, al igual que ocurría con el hilo radial seco. Pero, ahora, lo recubre de modo uniforme con una solución viscosa. Esta se compone en un 80 por ciento de agua; el resto lo forman aminoácidos, lípidos y sales. Sin embargo, estos «cilindros líquidos» solo serán estables si su longitud no resulta demasiado grande en comparación con su grosor. Si se estiran mucho más, las pequeñas perturbaciones que surjan en el recubrimiento comenzarán a oprimirlo transversalmente. Y, como consecuencia de la tensión superficial, lo que en un principio adoptaba la forma de un cilindro se dividirá en una sucesión de gotas más o menos equidistantes.

Como en tantos otros procesos, el mecanismo responsable de que esto ocurra no es otro que la segunda ley de la termodinámica: el afán de la naturaleza por ceder la mayor cantidad de energía posible al entorno. Una geometría esférica minimiza la superficie de contacto con el aire, por lo que de esta manera se libera

FOTOGRAFÍAS DE H. JOACHIM SCHLICHTING



LOS HILOS DE UNA TELARAÑA se tornan claramente visibles cuando aparecen recubiertos



TAL Y COMO OCURRE con el recubrimiento viscoso de las telarañas, una capa de miel dispuesta sobre un hilo de nailon tensado (*fotografía*) acabará dividiéndose espontáneamente en una sucesión de gotas.

el exceso de energía superficial. La razón de que no se formen gotas completamente esféricas se debe a que la fibra central del hilo es hidrófila, por lo que siempre continuará recubierta por una película de líquido.

Un sencillo experimento casero nos permitirá recrear ese proceso de división del fluido viscoso. Introduzcamos el dedo índice en un frasco lleno de miel líquida y, después, pasemos un sedal fino entre el pulgar y la punta del dedo impregnada de miel, de modo que el hilo de nailon quede recubierto por el dulce de manera tan uniforme como sea posible. Ahora, si tensamos horizontalmente el hilo, podremos comprobar que la capa de miel comenzará a dividirse en pequeñas gotas.

Seda elástica

Sin embargo, la comparación con el hilo de una araña acaba aquí. A diferencia de lo que ocurre con el sedal, la fibra central de la telaraña, de grosor microscópico, comenzará ahora a contraerse debido a la aparición de ciertas fuerzas. Estas surgen como consecuencia de la minimización de la superficie del recubrimiento acuoso y son las que, en última instancia, confieren a los hilos su gran elasticidad.

Podemos visualizar el fenómeno con ayuda de un ejemplo. Cuando dos fibras radiales de la red se acercan, el hilo de captura que las conecta se afloja. Pero, en lugar de combarse, permanecerá tenso, ya que ahora el recubrimiento líquido cederá energía al entorno disminuyendo su longitud, lo que vuelve a reducir la superficie de contacto con el aire. El cilindro líquido puede acortarse porque la fibra central, extremadamente flexible e hidrófila, se ajusta a la nueva longitud formando una maraña en el interior de la gota. Además, el proceso libera energía de un modo complementario, ya que, en entornos acuosos, la fibra tiende a contraerse y formar una madeja. Por último, las gotas ofrecen espacio suficiente para que eso ocurra, dado que su acortamiento provoca que crezcan y se unan. De esta manera, el hilo opondrá ahora resistencia a un nuevo alargamiento, ya que se necesitaría energía mecánica para estirarlo y devolver a la capa húmeda la energía superficial liberada.

Así pues, la elasticidad de la seda de araña no se debe a una propiedad intrínseca del material, sino que obedece fundamentalmente a las características del recubrimiento líquido. Por cierto: el factor determinante es la cantidad de agua presente en el fluido; el resto de las sustancias no desempeñan ningún papel. Se ha demostrado que un hilo radial mojado se comporta como un hilo de captura y, a la inversa, que un hilo de captura seco pierde sus propiedades elásticas.



de rocío (*izquierda*) o cuando brillan a la luz del sol (*derecha*).

PARA SABER MÁS

Modulation of the mechanical properties of spider silk by coating with water. Fritz Vollrath y Donald T. Edmonds en *Nature*, vol. 340, págs. 305-307, julio de 1989.

EN NUESTRO ARCHIVO

Telas y sedas de araña. Fritz Vollrath en *IyC*, mayo de 1992.

Control del daño. Fiorenzo G. Omenetto y David L. Kaplan en *IyC*, octubre de 2012.

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

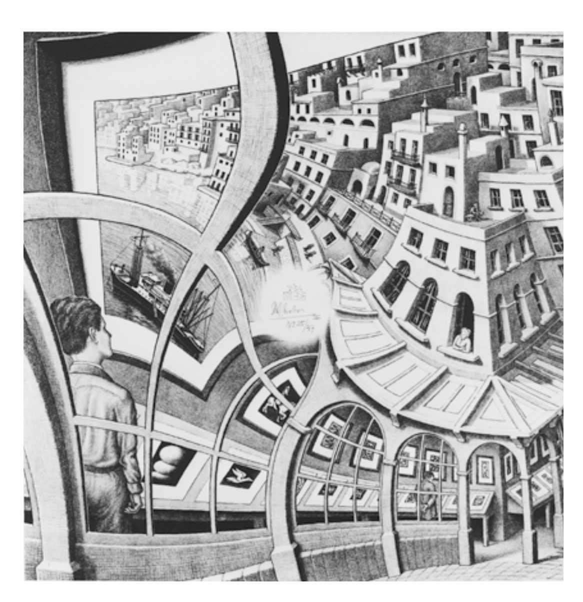
Galería de grabados

Transformaciones complejas y bucles infinitos autorreferentes: el análisis matemático de una de las obras de Escher

Hace unos días tuve el placer de visitar en Madrid la exposición dedicada a la obra de Maurits Cornelis Escher (1898-1972), que permanecerá hasta finales de junio en el Palacio de Gaviria. Organizada por el grupo Arthemisia y por la Fundación M. C. Escher, llega del Palacio Real de Milán con un aval de 700.000 visitas acumuladas en lo que lleva de gira. La muestra exhibe unas 200 obras del creador más célebre entre los matemáticos. Si decide acercarse, disfrutará de sus cintas de Moebius decoradas, sus sólidos platónicos y poliedros estrellados flotando en el vacío sideral, sus espacios hiperbólicos habitados por extraños seres o sus construcciones y figuras imposibles. Y, en particular, podrá deleitarse con la litografía titulada *Galería de grabados*, la cual recibe un tratamiento especial en la muestra y que, aprovechando que el Pisuerga pasa por Valladolid, será el centro de interés de nuestra columna de este mes.

La obra de Escher comenzó a conocerse en EE.UU. a partir 1951 debido a sendos artículos aparecidos en las revistas *Time* y *Life*. Pero se hizo tremendamente popular en 1966, año en que Martin Gardner dedicó al maestro una de sus columnas de Juegos Matemáticos en *Scientific American*. Escher conoció a Gardner no gracias a su famosa columna, sino a través de la relación de este con el matemático Donald Coxeter. A raíz de la popularización que Gardner hizo de uno de los trabajos de Coxeter, ambos genios establecieron comunicación epistolar, ya que Gardner solicitó a Escher la reproducción de una de sus obras para ilustrar las ideas del matemático. Bastó esa primera toma de contacto para que se estableciese una relación duradera entre ambos.

Como sucede con la literatura de Borges o la música de Bach, en la vasta obra de Escher abundan las ideas de infinito y autorreferencia. Y, aunque a primera vista no lo parezca, estos son los temas de la litografía *Galería de grabados* (*Prententoonstelling*), que el maestro acabó en 1956.



1. LITOGRAFÍA ORIGINAL: *Galería de grabados* de Escher, finalizada en 1956. Las deformaciones de la imagen siguen una pauta que el autor no supo cómo continuar en la parte central. En su lugar, optó por dejar una mancha donde aprovechó para estampar su firma.

Observemos con detenimiento la obra. Abajo a la derecha se nos presenta una entrada en arco a una galería. Si desplazamos nuestra mirada hacia la izquierda, podremos contar dos arcos acristalados completos y parte de otro, ya muy distorsionado, a través del cual vemos a un muchacho.

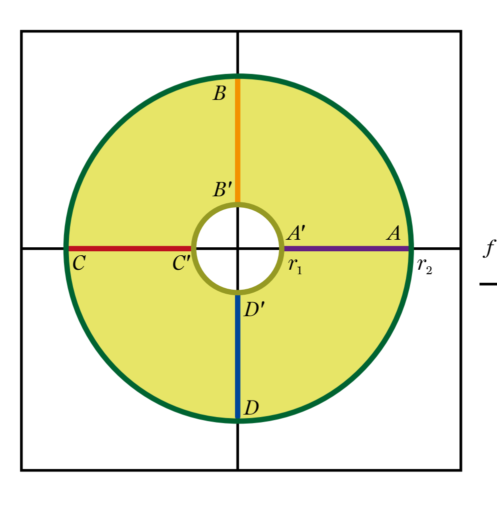
Pasemos al interior de la galería para situarnos a su vera. Si caminamos a su encuentro, hacia la izquierda, reconoceremos colgados en las paredes algunos motivos muy empleados por Escher e incluso uno de sus grabados en madera completo: *Tres esferas*. Casualmente, fue con esta obra con la que Gardner remató su columna de 1966 «El inquietante arte matemático de M. C. Escher», la cual dio a conocer las creaciones del maestro entre los matemáticos.

El chico está observando un grabado. Su cabeza, ligeramente inclinada hacia arriba, nos invita a seguir su mirada. En la obra que contempla el joven apreciamos un barco y un puerto, que, según los estudiosos, representa el de Senglea, en la isla de Malta. Al dirigir nuestra vista a tierra se alza ante nosotros una ciudad. Pero entonces un extraño efecto nos desorienta: ¡el propio grabado, en una especie de bucle infinito, incluye a la galería que lo contiene! Cuando se le preguntó a Escher qué efecto se proponía conseguir con esta obra, respondió: «Lo único que traté de representar era una superficie anular que se hincha sin principio ni fin».

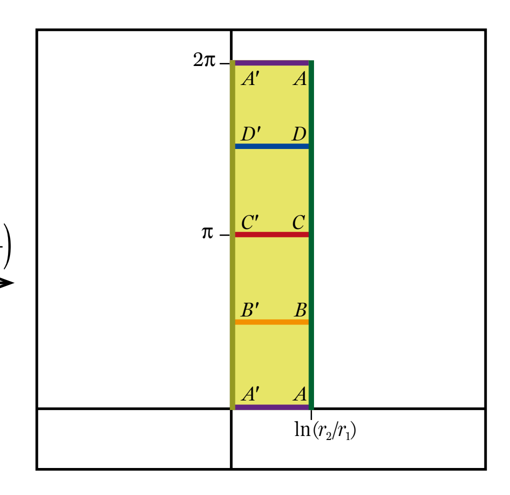
Por fortuna, disponemos de los bocetos originales empleados por Escher para confeccionar la obra, en los que podemos apreciar la galería antes de que fuese dilatada y retorcida. Escher primero pintó y cuadriculó esta versión «realista». Después, creó una retícula distorsionada que, desde el borde inferior derecho, se «inflaba» a medida que giraba en sentido horario. Y, con paciencia y arte, traspasó cada celda de la versión realista a su correspondiente cuadrícula en la versión transformada.

La mancha blanca

El lector se habrá percatado de la mancha blanca que ocupa el centro de la litografía. Intente pensar por un momento



$f(z) = \ln\left(\frac{z}{r_1}\right)$



2. TRANSFORMACIÓN LOGARÍTMICA: Efecto de la función logaritmo sobre una corona circular de radios r_1 y r_2 en el plano complejo. El resultado es un rectángulo vertical de altura 2π. Por claridad, las figuras indican cómo se transforman varios puntos y segmentos de la corona original.

cómo solucionaría usted la continuidad del grabado en ese punto. ¿Complicado, verdad? Escher también se vio desbordado, de modo que zanjó la cuestión usando el hueco para estampar su firma.

En 2003, los matemáticos de la Universidad de Leiden Bart de Smit y Hendrik W. Lenstra Jr. intuyeron que el problema tal vez pudiera solucionase con técnicas de análisis complejo. Para ello, necesitaban recorrer el camino opuesto al de Escher: buscaron las transformaciones matemáticas inversas que «rectificaban» la litografía y pasaban de la versión «superficie anular que se hincha sin principio ni fin» a la versión realista de la que partió. Esta última es la imagen de una galería donde hay un chico que mira un cuadro que, justamente, coincide con la imagen original, solo que reducida.

En su momento, el propio Escher apuntó: «El joven de la izquierda está mirando un grabado en el que él mismo aparece». Una frase que nosotros podríamos continuar diciendo: «... mirando, a su vez, un grabado en el que él mismo aparece, mirando, a su vez...» etcétera. Ya hemos hablado en esta sección del efecto Droste: una forma elemental y primitiva de recursividad visual. Aquí nos encontramos ante el mismo fenómeno, una imagen que contiene una réplica en miniatura de sí misma. Si la réplica es fiel, debería incluir otra réplica aún menor, la cual debería contener otra, y así hasta el infinito.

Tras rectificar la imagen, el hueco original aparecía como una mancha en espiral, así que De Smit y Lenstra tuvieron que rellenarla y «suavizar» las imperfecciones de la litografía original. El paso siguiente sería invertir la función que rectificaba la imagen, aplicarla a la versión realista perfeccionada y, por último, reconstruir por completo, pero sin el hueco, la litografía de Escher. Antes de explicar su resultado, sin embargo, hemos de hacer un pequeño inciso.

Transformaciones complejas

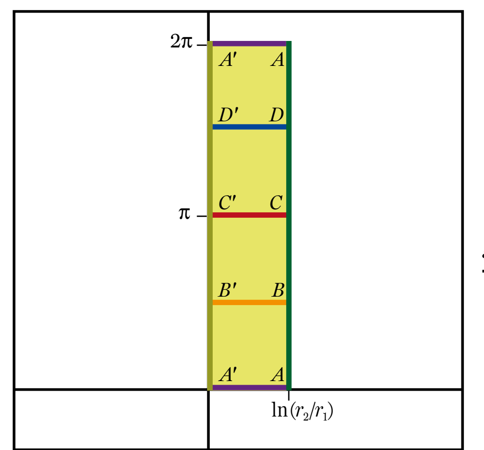
Tras el parto surrealista de los números complejos como soluciones de la ecuación cúbica y la popularización de su uso en la manipulación algebraica, el siguiente gran paso hacia el establecimiento de la teoría de variable compleja consistió en la visualización de estos números como puntos del plano.

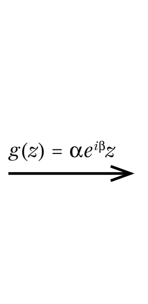
Un número complejo $z = x + iy$, donde $i = \sqrt{-1}$ denota la unidad imaginaria y x e y son números reales, puede interpretarse como un par ordenado (x, y); es decir, como un punto del plano cuyas coordenadas corresponden, respectivamente, a la parte real (x) y a la imaginaria (y) de z. Esto nos permite representar figuras geométricas como conjuntos de puntos en el plano complejo. Por ejemplo, una circunferencia de radio unidad y centrada en el origen quedaría descrita por el conjunto de números complejos cuyas partes real e imaginaria satisfacen la condición $x^2 + y^2 = 1$.

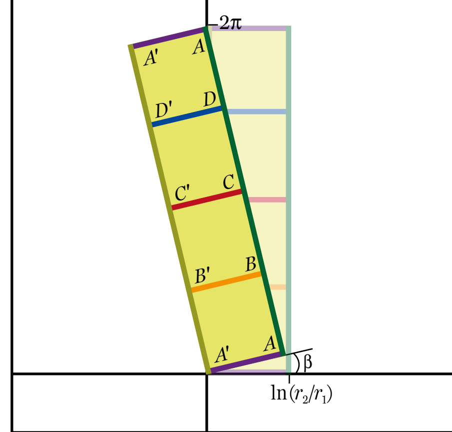
También podemos definir funciones entre números complejos, como por ejemplo:

$$f(z) = z + (1 + i)\ .$$

Si ahora aplicamos esta función a los puntos de nuestra circunferencia, lo que estaremos haciendo será trasladar el centro al punto $(1, 1)$. En general, si $b = c + di$, la función $f(z) = z + b$ simplemente traslada cada punto (x, y) al punto

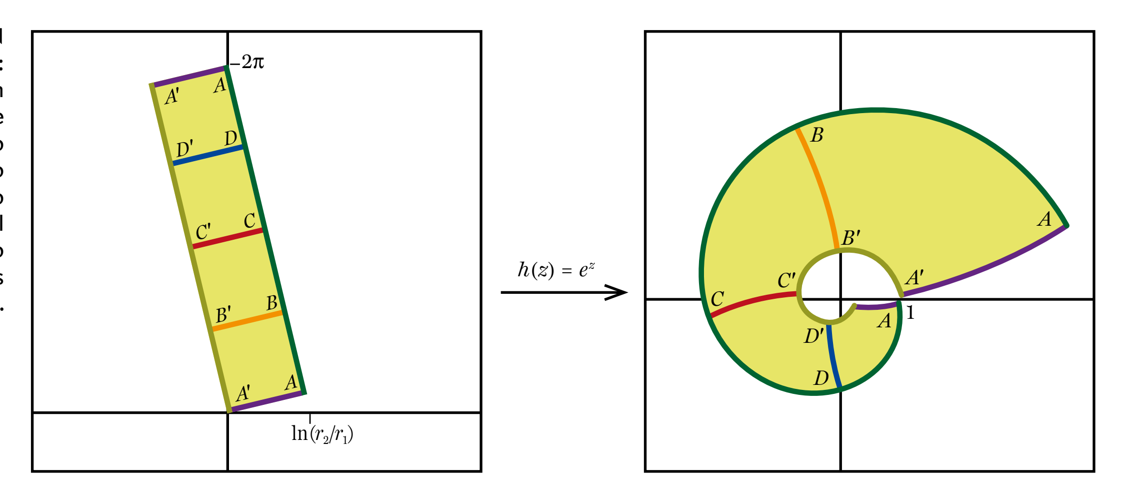






3. ROTACIÓN Y DILATACIÓN: La función indicada toma el rectángulo obtenido en el paso anterior, lo rota un ángulo β y lo dilata en un factor α. Los parámetros α y β se escogen de tal modo que la diagonal del rectángulo rotado coincida con el eje imaginario y su longitud valga 2π.

ADAPTADO DE «THE DROSTE EFFECT IMAGE TRANSFORMATION», JOS LEYS EN *COMPUTERS AND GRAPHICS*, VOL. 31, N.º 3, PÁGS. 516-523, JUNIO DE 2007



4. TRANSFORMACIÓN EXPONENCIAL: Efecto de la función exponencial sobre el rectángulo rotado obtenido en el paso precedente. El resultado es una zona del plano complejo cuyo contorno sigue curvas logarítmicas.

$(x + c, y + d)$. Por otro lado, si nuestra función es $f(z) = 3z$, estaremos ampliando nuestra circunferencia tres veces, y si es $f(z) = z/3$, la estaremos reduciendo en el mismo factor.

Si expresamos los números complejos en coordenadas polares, $z = re^{i\theta}$, donde $r \geq 0$ es el módulo del número complejo (la distancia del punto correspondiente al origen de coordenadas) y θ su argumento (el ángulo que forma el rayo resultante con el eje de abscisas), el lector podrá comprobar con facilidad que una transformación dada por:

$$f(z) = az + b\ ,$$

donde a y b son números complejos, equivale a una traslación dada por b, a una ampliación o contracción determinada por el módulo de a, y a un giro igual al argumento de a. Este tipo de funciones se conocen en matemáticas con el nombre de «transformaciones afines».

De coronas a espirales

En 2007, el ingeniero mecánico y artista digital Jos Leys explicó en un delicioso artículo cómo funcionaban las transformaciones complejas que usaron De Smit y Lenstra para resolver la cuestión. Para ello, solo necesitamos componer tres funciones.

La primera es una transformación logarítmica. Dado un número complejo $z = re^{i\theta}$, el logaritmo se define como:

$$\ln z = \ln r + i\theta\ .$$

Puesto que $0 \leq \theta \leq 2\pi$ (recordemos que θ es un ángulo), la función $f(z) = \ln z$ transforma todo el plano complejo, excepto el origen, en una banda vertical infinita de anchura 2π. Y como:

$$re^{i\theta} = re^{i(\theta + 2\pi n)}$$

para todo entero n, cualquier banda entre $2\pi n$ y $2\pi(n + 1)$ puede considerarse una imagen del plano complejo bajo la función logaritmo. De modo que esta transforma el plano complejo en un número infinito de copias con forma de bandas de anchura 2π.

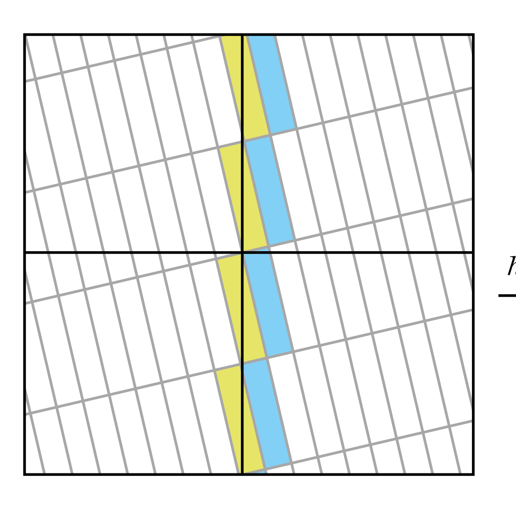
Para nuestros propósitos, basta con que sepamos cómo se transforma una corona circular centrada en el origen de radios r_1 y r_2 bajo $f(z) = \ln(z/r_1)$ (*véase la figura 2*). Observemos que la circunferencia interior, de radio r_1, se convierte en una línea vertical de altura 2π que arranca del origen, mientras que la circunferencia exterior, de radio r_2, se transforma en una línea vertical de la misma altura pero que comienza en $x = \ln(r_2/r_1)$. Así pues, vemos que nuestra corona inicial se ha metamorfoseado en un rectángulo.

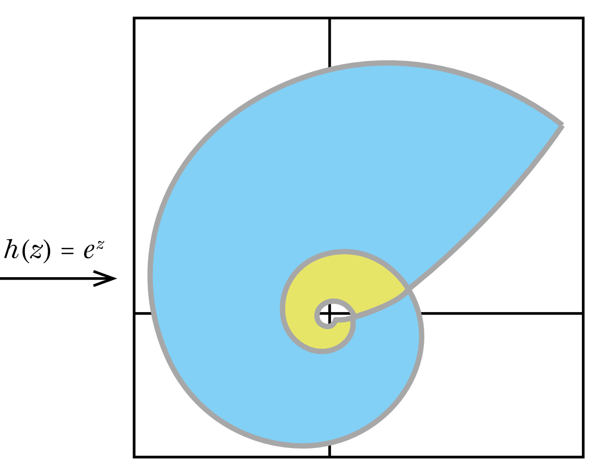
La segunda parte de la transformación que describe Leys consiste en rotar y dilatar. Giremos ahora nuestro rectángulo de modo que su diagonal coincida con el eje imaginario, y multipliquemos su longitud por el factor adecuado para que la diagonal acabe midiendo 2π (*véase la figura 3*). Con un lápiz y sin más ayuda que la trigonometría básica que aprendemos en la escuela, el lector podrá comprobar en pocos pasos que dicho trabajo lo ejecuta la función:

$$g(z) = \alpha e^{i\beta} z\ ,$$

donde $\alpha = \cos\beta$, y:

$$\beta = \tan^{-1}(\ln(r_2/r_1)/2\pi)\ .$$





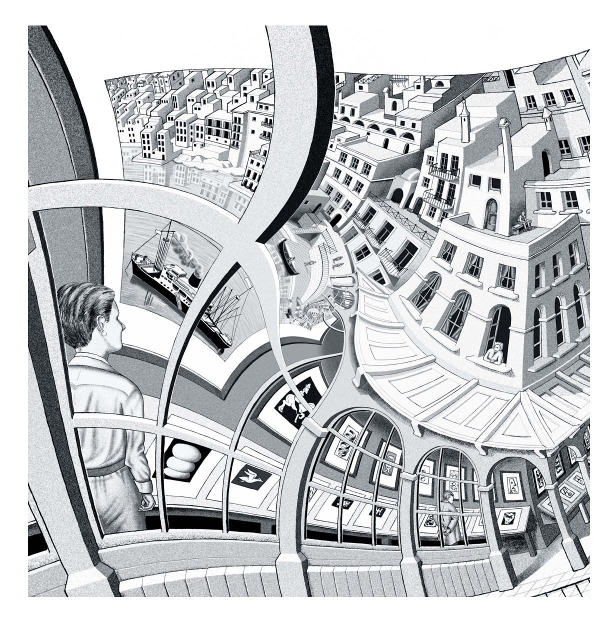
5. EFECTO DROSTE: Al teselar todo el plano complejo con rectángulos inclinados y calcular cómo se transforman bajo la función exponencial, se obtiene una nueva teselación del plano, formada por un bucle infinito de regiones espirales autosemejantes. La figura indica cómo se transforman ocho rectángulos. Cada uno de ellos va a la zona espiral de su mismo color que se muestra a la derecha.

ADAPTADO DE «THE DROSTE EFFECT IMAGE TRANSFORMATION», JOS LEYS EN *COMPUTERS AND GRAPHICS*, VOL. 31, N.º 3, PÁGS. 516-523, JUNIO DE 2007

Por último, aplicaremos la función exponencial:

$$h(z) = e^z = e^x(\cos y + i \operatorname{sen} y) .$$

Observemos que, si dejamos x fijo (una recta vertical), la variación de y describe una circunferencia de centro 0 y radio e^x. Así pues, esta función transforma rectas verticales en circunferencias centradas en el origen. Por otro lado, si fijamos y, obtenemos una semirrecta infinita que forma un ángulo de y radianes con el eje de abscisas. Por último, si aplicamos esta función a una recta inclinada, variarán tanto x como y, por lo que, a medida que avanzamos por la recta, crecerán tanto el módulo (e^x) como el argumento (y) de los puntos transformados. El resultado será, por tanto, una espiral logarítmica.



6. LITOGRAFÍA COMPLETADA: El misterio del punto central blanco de *Galería de grabados* resuelto por los matemáticos de la Universidad de Leiden Bart de Smit y Hendrik W. Lenstra.

Como consecuencia de lo anterior, la función exponencial transformará los lados de nuestro rectángulo inclinado en espirales (*véase la figura 4*). Notemos que los puntos $A' = 0$ y $A = 2\pi i$ del rectángulo original van a parar al mismo punto de la espiral, ya que $e^0 = e^{2\pi i} = 1$.

Al combinar las tres transformaciones en forma de composición de las funciones correspondientes, obtenemos la expresión:

$$F(z) = h(g(f(z))) = (z/r_1)^\gamma ,$$

donde podemos calcular con facilidad que el exponente γ viene dado por:

$$\gamma = \alpha e^{i\beta} .$$

Ya tenemos la superficie que aumenta y gira de la que nos hablaba Escher.

Efecto Droste

Introduzcamos ahora el efecto Droste. Para ello, después de haber transformado la corona circular en un rectángulo inclinado, teselaremos todo el espacio con él. Luego, aplicaremos la transformación exponencial a todos los rectángulos de ese mosaico infinito.

En la imagen que reproducimos aquí (*véase la figura 5*) resaltamos ocho de los rectángulos que aparecen después de haber teselado con ellos todo el plano. La transformación exponencial lleva ahora cada uno de los rectángulos de color verde a la región espiral del mismo color que se muestra a la derecha. Por su parte, los cuatro rectángulos azules se transforman en la región espiral que envuelve a la anterior.

Así pues, al transformar todo el mosaico, obtendremos un número infinito de réplicas de la imagen original que, sin embargo, ahora teselan el plano con una sucesión de espirales. Todas esas réplicas son autosemejantes: si aumentamos y rotamos de la manera adecuada el área espiral verde, recubriremos exactamente la azul. Por tanto, si nos acercamos o alejamos rotando la imagen, todo permanecerá invariante.

Vuelta a la litografía

Al analizar la estructura de la *Galería de grabados* y considerar estas transformaciones, los investigadores encontraron que el cociente r_2/r_1 era aproximadamente 256. Eso significa que el ángulo de rotación que debemos aplicar en el segundo paso es:

$$\beta = \tan^{-1}(\ln(r_2/r_1)/2\pi) \approx 41{,}429 \text{ grados},$$

lo que nos da un factor de escala de:

$$\alpha = \cos\beta \approx 0{,}749 .$$

Recordando que $\gamma = \alpha e^{i\beta}$, obtenemos que el módulo de $(r_2/r_1)^\gamma$ es aproximadamente 22,58 y que su argumento vale unos 157,62 grados. Estos datos ya nos permiten reconstruir la espiral autosemejante infinita.

Para apreciar el resultado final de los dos años de trabajo de estos investigadores, les recomiendo que visiten la página web que se cita en las referencias. Encontrarán en ella unos maravillosos vídeos que muestran cómo, cuando la nueva «litografía digital» se rota en sentido horario 157,62 grados y al mismo tiempo se aumenta su tamaño en un factor de 22,58, regresamos hipnóticamente al punto de partida. ¡Un asombroso y bello bucle infinito autorreferente!

A pesar de que Escher no tenía más que conocimientos elementales de matemáticas, su intuición lo ponía a la altura de los grandes geómetras. Él mismo comentaba al respecto: «Manteniendo alerta mi mirada frente a los enigmas del mundo, si bien interesado en su plasmación sensible, entro en contacto, en cierto modo, con el dominio de las matemáticas. Aunque no dispongo de una formación en ciencias exactas ni de conocimientos especializados, a menudo me siento más próximo a los matemáticos que a mis colegas de profesión».

Así que la transformación compleja que utilizaron De Smit y Lenstra para rematar su obra le hubiera parecido mágica. Aunque más mágico nos debe parecer a nosotros que Escher fuera capaz de imaginarla. IyC

PARA SABER MÁS

The eerie mathematical genius of Mauritius C. Escher. Martin Gardner en *Scientific American*, abril de 1966.

El arte de M. C. Escher. Martin Gardner en *Carnaval matemático*, Alianza Editorial, 1983.

The mathematical structure of Escher's *Print gallery*. Bart de Smit y Hendrik W. Lenstra, Jr. en *Notices of the American Mathematical Society*, vol. 50, n.º 4, págs. 446-457, abril de 2003.

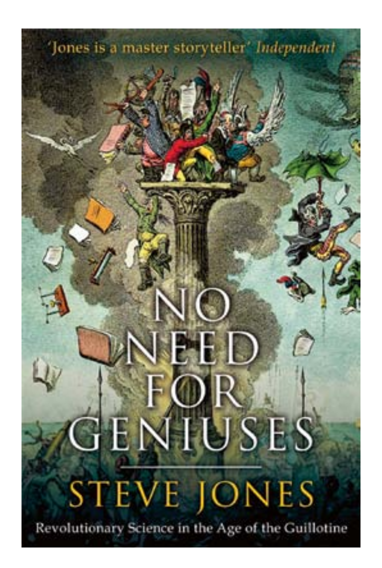
Escher and the Droste effect. Página web alojada en la Universidad de Leiden con información, imágenes y animaciones sobre el tratamiento matemático de *Galería de grabados*.

The Droste effect image transformation. Jos Leys en *Computers and Graphics*, vol. 31, n.º 3, págs. 516-523, junio de 2007. **www.josleys.com/article_show.php?id=82**

EN NUESTRO ARCHIVO

Las metáforas de Escher. Doris Schattschneider en *IyC*, enero de 1995.

El efecto Droste y los Alcántara. Bartolo Luque en *IyC*, mayo de 2016.



NO NEED FOR GENIUSES
REVOLUTIONARY SCIENCE IN THE AGE OF THE GUILLOTINE

Steve Jones
Little, Brown, 2016

Ciencia en la ciudad

El caso único del París de la Revolución

Por los años en torno a la Revolución francesa, cuya fecha inaugural emblemática se cifra en la toma de la Bastilla, el martes 14 de julio de 1789, París presentaba más científicos experimentadores y teóricos que el resto del planeta. La ciudad respiraba afán de saber por los cuatro costados. No suelen atender a ese fenómeno los historiadores, proclives a considerar ese acontecimiento como una revuelta burguesa frente a una aristocracia corrupta y estéril. Lo cierto es que intervinieron los científicos más que los banqueros: muchos científicos se implicaron en la política y muchos políticos pasaban parte importante de su jornada en el laboratorio. Juntos se propusieron construir un mundo nuevo. En Antoine Lavoisier se representaba, por antonomasia, la simbiosis entre el científico eximio y el político que trabajaba para el fisco.

Lavoisier, fundador de la química y la fisiología modernas, experto en pólvoras e investigador agrónomo, fue arrestado y llevado ante la corte de justicia revolucionaria. Arreciaron las protestas de quienes veían en él un genio de la ciencia. Les hizo frente el presidente del tribunal con unas palabras, apócrifas en su atribución aunque no en su pronunciación, que han pasado a la historia y, de paso, dan título al libro de Steve Jones: «La República no necesita genios». Lavoisier fue guillotinado el 8 de mayo de 1794. Lagrange comentó al día siguiente: «Ha bastado un instante para cortarle la cabeza, pero Francia necesitará un siglo para que aparezca otra similar». [*Véase el monográfico* «Lavoisier: La revolución química» por Marco Beretta, colección Temas de *IyC* n.º 64, 2011.]

No fue el único. Conocieron igual suerte el astrónomo Jean Sylvain Bailly, el geólogo e ingeniero de minas Philippe-Frederic Dietrich, el botánico François Rozier, y el astrónomo y matemático Bochart de Saron. De hecho, uno de cada cuatro miembros de la Academia de las Ciencias sufrió una muerte violenta o un encarcelamiento durante la Revolución. ¿Fue una paradoja que esta estallase cuando se vivía uno de los renacimientos más gloriosos de la ciencia?

Para describir el panorama científico de París, el autor se instala en el observatorio privilegiado de la torre Eiffel, abierta en 1889 en conmemoración del centenario de la caída de la Bastilla, símbolo audaz de la modernidad y durante cuarenta años el edificio más alto del mundo. La estructura, afirmaba Gustave Eiffel, debía representar el siglo de la industria y de la ciencia, una época preparada por el poderoso impulso científico de la segunda mitad del siglo xviii. Andaba en razón, pues la ciudad constituía entonces el centro de un empeño que no volvería a repetirse en la historia.

El propio Eiffel trabajó apoyándose en las relaciones matemáticas entre forma, tamaño, masa y velocidad. En un estudio posterior sobre aerodinámica, construyó en la base de la torre el primer túnel de viento funcional del mundo, el cual alcanzaba velocidades cercanas a las experimentadas por los primeros aeroplanos y que fue muy utilizado por los pioneros de la aviación. La estructura alojaba un laboratorio de fisiología que examinaba los efectos del ejercicio a quienes subían las escaleras. Contaba también con una estación meteorológica, empleada para comparar vientos y temperaturas en superficie y en altura. Se utilizó como observatorio cuando la niebla oscurecía la visión desde el suelo. En ella se realizaron las primeras mediciones de cambios de carga eléctrica registrados en la atmósfera. No solo fue el lugar donde se produjo la primera radiotransmisión del mundo, en 1898, sino que además en ella se compararían los niveles de radiación. Se asienta sobre el Campo de Marte, pista de lanzamiento del primer globo de hidrógeno, que se elevó en 1783.

Al norte de la torre divisamos los Jardines de Luxemburgo, campo experimental de agronomía; Montmartre, donde se colocó un espejo giratorio que sirvió para medir la velocidad de la luz, y el Museo de Artes y Oficios, primer museo de la técnica, que albergaba máquinas, modelos, herramientas y libros de todas las artes y oficios. Un tanto alejado, el Museo de Ciencia e Industria de La Villette.

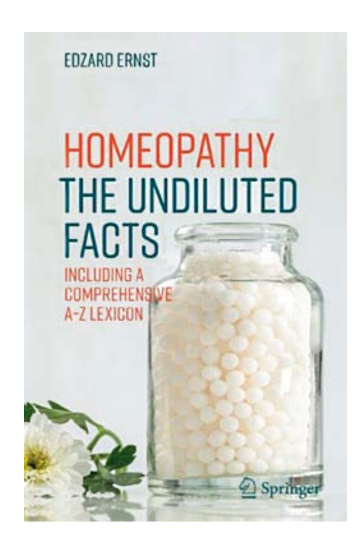
Hacia el sur de la torre Eiffel se encuentran los laboratorios que establecieron la teoría microbiana de la enfermedad, con identificación de los agentes de la rabia, el tifus, la peste y, en tiempos modernos, el sida. En esa misma dirección, la sede de la Société d'Accueil, un laboratorio privado establecido en 1807, que constaba de 15 miembros, nueve de los cuales serían socios de la Real Sociedad de Londres. Entre otros, el inventor de la lejía, el fundador de la biogeografía y el primer explorador aéreo de la atmósfera, así como los descubridores del origen de los meteoritos, el reloj biológico interno y la polarización de la luz. Si proseguimos, daremos con el Palacio de Versalles, cuyos jardines poseían la mayor colección de especies. Allí se produjo un experimento innovador en genética: una mutación en una línea de fresas de la que resultaron hojas únicas en vez de trifoliadas. La nueva forma se cruzó con otras y los resultados aparecieron en un texto de 1766 titulado *Sobre la distinción de especies, razas y variedades*. En 1783, se asistió allí al primer vuelo público de un globo.

En la dirección este desde la torre se yergue la Academia de Ciencias, bajo la cúpula de lo que antaño fue el Colegio Mazarin, la sección de la Universidad de París en la que estudió Lavoisier. Podemos continuar para alcanzar el Observatorio de París, cuyos astrónomos establecieron la forma de la Tierra y promovieron una inspección geológica muy precisa de la nación. También, el Jardín de Plantas y el Museo de Historia Natural, donde nació la

paleontología moderna y se descubrió la radiactividad. Reparemos, asimismo, en el Hospital de la Pitié-Salpêtrière, donde la psiquiatría y la neurología dieron sus primeros pasos.

Hacia el oeste daremos con la Oficina de Pesas y Medidas, fundada en reconocimiento de la invención francesa del sistema métrico. Entre sus muros se conserva la barra de platino e iridio que sirvió para definir el metro y la masa que cumple la misma función para el kilogramo. En los cuatro puntos cardinales se respiraba un mismo aliento: la educación científica habría de informar los asuntos de Estado y crear un país racional. Y ello pese a quienes, como Jean-Paul Marat, epítome de populistas, abominaban de la matemática porque inducía la devoción a símbolos y fórmulas.

—Luis Alonso



HOMEOPATHY
THE UNDILUTED FACTS
Edzard Ernst
Springer International Publishing, 2016

Ciencia y homeopatía

El análisis del experto que cruzó el abismo

Para alguien como yo, que escribe historias de ciencia, probablemente no haya protagonista más interesante que aquel científico que ha cruzado el abismo, ha convivido con los demonios de sus dudas, ha trabajado para despejarlas y, finalmente, ha tenido la valentía de aceptar y defender las conclusiones, aunque estas fueran a acabar con sus creencias e incluso con buena parte de su vida. Edzard Ernst es un buen ejemplo de ello. Con su último libro, *Homeopathy: The undiluted facts*, nos quiere mostrar las sombras, pero también las luces, que se ciernen sobre esta terapia alternativa.

Aunque no se trata del primer libro en el que Ernst aborda la cuestión, tal vez sí sea el más concreto y maduro. Tras *Trick or treatment* y *A scientist in Wonderland*, Ernst expresa ahora sin tapujos a quién no va dirigida su última obra: «Si usted está completamente convencido de que la homeopatía proporciona un tratamiento eficaz y seguro para todos los males; si cree que la homeopatía es víctima de una conspiración de la malvada industria farmacéutica; si piensa que mi objetivo es que tome peligrosos medicamentos sintéticos, entonces este probablemente no sea un buen libro para usted. Si, por otro lado, está convencido de que todo lo relacionado con la homeopatía es una idiotez; que la homeopatía no ha hecho absolutamente ninguna contribución a la sanidad; que cualquiera que informe de efectos positivos tras haber usado homeopatía es un farsante; o que todos los consumidores que se sienten tentados a probar la homeopatía son unos estúpidos, entonces este libro tampoco es lo que desea».

Para aquellos que no lo conozcan, Ernst es uno de los mayores expertos mundiales en homeopatía, con una historia personal fascinante: este médico alemán no solamente trabajó en una clínica homeopática, sino que fue el primer catedrático de medicina alternativa del mundo, obtuvo fondos para investigar científicamente las terapias alternativas y acabó perdiendo su trabajo por conseguir, precisamente, aquello que se le había encomendado: hallar los hechos científicos que se esconden tras ellas.

Ernst fue el primer catedrático de medicina alternativa del mundo. Perdió su trabajo por conseguir lo que le habían encomendado: hallar los hechos científicos que se esconden tras esas terapias

El autor estructura el libro en dos partes. En la primera expone varios aspectos generales de la homeopatía, como su definición y principios generales (capítulo 2), su aceptación y uso internacional (capítulo 4) o su historia (capítulo 5). Ernst demuestra que su experiencia le aporta cierta ventaja y amplitud de miras con respecto a otros autores que, aunque puedan ser científicos, nunca han tenido relación directa con esta terapia. A lo largo de la obra, desglosa uno por uno los principios de la homeopatía que no presentan base científica, como la eficacia terapéutica de remedios homeopáticos que, en la mayoría de los casos, son el resultado de inmensas diluciones del principio activo. De ahí proviene, precisamente, el juego de palabras que da título a la obra («Homeopatía: Los hechos sin diluir»).

Con todo, Ernst concede también algunos valores positivos a esta práctica. El primero se refiere a sus orígenes y a la fascinante historia de su creador, Samuel Hahnemann. Según cuenta, Hahnemann probó y documentó de forma sistemática —aunque llegara a conclusiones equivocadas— el efecto de distintas sustancias y diluciones en su propio cuerpo, con el objetivo de hallar evidencias empíricas que le llevaran a desarrollar terapias más efectivas y seguras. El autor nos recuerda que, en aquella época, a finales del siglo xviii, la medicina se basaba todavía en métodos arcaicos que no contemplaban, por ejemplo, el concepto de ensayo clínico.

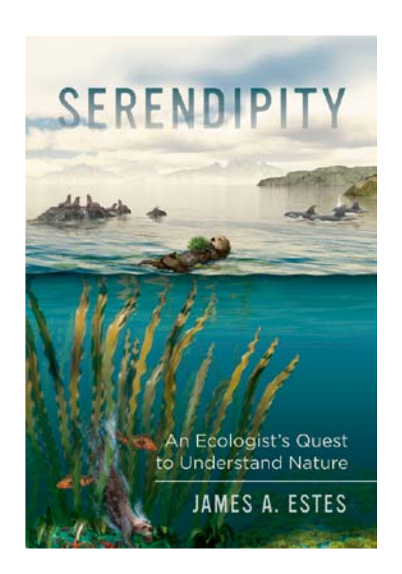
Ernst también intenta ponerse en la piel de los pacientes e identificar los fac-

tores que pueden hacer que se aproximen a la homeopatía, al tiempo que les invita a leer el capítulo 9 (que comienza explicando qué es una prueba científica y qué no lo es). En esta parte, Ernst reconoce un aspecto positivo de la homeopatía: el tiempo de consulta con el paciente, el cual supera en muchos casos al de la medicina convencional. La intención de Ernst de mostrar todas las caras del poliedro homeopático se manifiesta de nuevo en los capítulos 6 («Diferentes tipos de homeopatía y homeópatas») y 10 («Argumentos espurios a favor y en contra de la homeopatía»).

Tras todo esto comienza la segunda parte del libro: «Léxico de homeopatía», con un estilo y un contenido sustancialmente diferentes a los de la primera. Aquí el autor se dedica a definir conceptos tan dispares como ébola, *detox* o nanopartículas, los cuales guardan en algunos casos relación directa, aunque no siempre, con la homeopatía. Pese a que esta parte de la obra pueda resultar un tanto confusa para el lector, aporta también algunas reflexiones interesantes. Por ejemplo, Ernst define la empatía y reconoce de nuevo que los homeópatas ofrecen, en muchos casos, un trato más personal hacia sus pacientes que los profesionales de la medicina convencional. Finalmente, encontramos algunas anécdotas un tanto escabrosas, como el apoyo que tuvo la homeopatía por parte de algunos dirigentes del nacionalsocialismo alemán, así como citas curiosas de personajes célebres, como Mahatma Gandhi o Charles Darwin, sobre esta terapia alternativa.

En resumen, el último libro de Edzard Ernst es una declaración de intenciones. La primera y primordial: defender la prueba científica como herramienta para comprender las incoherencias que se esconden tras una terapia tan controvertida —y ampliamente utilizada— como la homeopatía. Pero también, y muy destacable, ponerse en la piel de quienes la utilizan y reconocer que presenta, además, algunos aspectos de los que podríamos aprender. Y esto probablemente sea lo mejor de la obra: descubrir la opinión del experto que cruzó el abismo y que es capaz de mirar a ambos lados de él.

—Guillermo Orts Gil
Doctor en física química
y divulgador científico



SERENDIPITY
AN ECOLOGIST'S QUEST TO UNDERSTAND NATURE
James A. Estes
University of California Press, 2016

Redes tróficas y ecología marina

La importancia de los grandes depredadores

Acotemos de entrada la tesis de este libro, la cual establece que los ecosistemas naturales dependen, en su estructura y función, de los grandes depredadores que ocupan la cima de la pirámide trófica. La pérdida de esas especies por culpa de la erosión de la biodiversidad repercute en la biología del hábitat. El desarrollo de tales postulados se entrevera aquí con la carrera profesional del autor, iniciada en 1970. Por ecología entiende el estudio de la distribución y abundancia de las especies, sus interacciones mutuas y con el entorno físico. Para ejemplificarlo, se esgrimen las nutrias marinas y los bosques de laminarias, que demuestran la interconexión entre especies en la cadena trófica y los fenómenos dinámicos asociados. Pensó en un comienzo que los ecosistemas eran entidades funcionales que se autosustentaban. Al avanzar en la investigación, se convenció de que los ecosistemas costeros estaban conectados con tierra firme y con el mar abierto a través, sobre todo, del movimiento de los grandes mamíferos.

Con un triple propósito se escribió este libro: reseñar lo observado a lo largo de casi medio siglo sobre las interrelaciones entre depredadores y presas; esquematizar lo aprendido de la interrelación entre la nutria marina y los ecosistemas oceánicos costeros; y, por fin, explicar cómo la ciencia procede a menudo por factores azarosos de la fortuna, lo que explica el título, *Serendipity*. «Toda mi vida profesional ha estado sembrada de acontecimientos fortuitos que nunca preví.» Estes no hubiera sido ecólogo marino si no hubiera sido por el encuentro con Robert Paine en 1971, quien dos años antes había introducido el concepto de «especie clave» para designar a aquella especie que, a largo plazo, produce un efecto desproporcionado sobre el ecosistema en relación con su abundancia; en este caso, el impacto que ejercen las nutrias sobre los bosques de laminarias.

La relación con Peter Steinberg, otra casualidad, le sugirió un trabajo conjunto sobre la coevolución de planta y herbívoro. Comprender las propiedades dinámicas de las especies interrelacionadas en redes alimentarias es complejo. Para cada nexo particular depredador-presa importa conocer en qué medida la distribución y abundancia del consumidor viene determinada por la presa, y en qué medida es la presa la que está condicionada por el consumidor.

La nutria marina (*Enhydra lutris*) es un mamífero carnívoro de la familia de los mustélidos que habita en el Pacífico Norte, desde el Japón hasta California. En los últimos siglos ha experimentado una historia singular. Icono cultural de las tribus que vivían en la costa del Pacífico Norte, se convirtió en objeto de explotación en el comercio de la piel. Eso llevó a la especie al borde de la extinción, de la que se salvó merced a la firma de un tratado internacional sobre la regulación de su caza en 1911. Quedaba por entonces una docena escasa de colonias. Luego, a medida que la especie comenzó a recuperarse, la atracción turística la erigió en símbolo de esperanza para la conservación, a la par de los pinzones de Darwin.

Estes, que ha estudiado la especie meridional (*Enhydra lutris nereis*), procedente de una de esas colonias residuales, ha observado que su área geográfica se va expandiendo hacia el norte y el sur de California con una redistribución estacional de cientos de individuos. En su cátedra de ecología y biología evolutiva en la Universidad de California en Santa Cruz se ha venido investigando la dinámica de poblaciones, el comportamiento y las pautas de movimiento estacionales de las nutrias en el extremo meridional. Y han avanzado una hipótesis capital para el avance de la ecología: las nutrias marinas constituyen una especie clave para el sostén de los ecosistemas de bosques de laminarias mediante el control de los erizos de mar que se alimentan de laminarias. Compararon los ecosistemas costeros de las islas con nutrias y sin nutrias y concluyeron que no había bosques de laminarias sin nutrias.

El estudio del control de un ecosistema por un predador en la cumbre y la inducción de perturbaciones para contrastar hipótesis ecológicas estaban en su infancia en los años setenta. Las nutrias de las islas Aleutianas, el archipiélago de Alaska, evidenciaban su control de buena parte del resto de la comunidad costera al alimentarse de erizos de mar, consumidores primarios de laminarias, y regular la concentración de las mismas. Allí donde había nutrias, había bosques de laminarias y abundancia de otras especies (peces, cangrejos, estrellas de mar, bivalvos, gasterópodos, focas, aves y demás) que dependían de las plantas para su hospedaje o dieta. Donde no había nutrias, los erizos prosperaban, se comían las laminarias y agotaban el medio.

Los estados, nítidamente dispares, que caracterizan a los ecosistemas con y sin nutrias no cambian de forma gradual y escalonada, sino que lo hacen con brusquedad. Esa pauta se produce no solo en el Pacífico Norte, sino en los ecosistemas de laminarias de todo el mundo. En las Aleutianas, donde se ha observado el ascenso y desplome de poblaciones de nutrias en el transcurso de decenios, las interacciones entre algas y erizos cambia de un estado agonista (beneficioso para los erizos y degradante para las laminarias) a un estado amensalista (degradante para los erizos y neutro para las laminarias). [*Véase* «Redes mutualistas de especies», por Pedro Jordano y Jordi Bascompte; Investigación y Ciencia, septiembre de 2008, *y* «Ecosistemas al borde del colapso», por Carl Zimmer; Investigación y Ciencia, diciembre de 2012.]

A comienzos de los años noventa, Estes y su grupo se percataron de la aparición de un número creciente de orcas (*Orcinus orca*) que depredaban las nutrias. Algo debía de haber cambiado en mar abierto para sacar a las orcas de sus hábitats oceánicos habituales e impulsarlas hasta zonas costeras. La merma de presas, ballenas, por las flotas pesqueras, había obligado a las orcas a buscar otras presas alternativas. Los investigadores avanzaron una hipótesis osada: en el transcurso de los últimos cuatro decenios se habían producido colapsos en cadena. Tras el hundimiento de las poblaciones de grandes ballenas debido a la sobrepesca, las orcas cambiaron de presa y fueron diezmando una especie tras otra: *Phoca vitulina* (foca común), *Eumetopias jubatus* (león marino de Steller) y, por último, las nutrias marinas. La hipótesis del megacolapso, no exenta de críticas, parece ahora suficientemente sólida.

—*Luis Alonso*

NOVEDADES



EL JAZZ DE LA FÍSICA
EL VÍNCULO SECRETO ENTRE LA MÚSICA Y LA ESTRUCTURA DEL UNIVERSO

Stephon Alexander
Tusquets, 2017
ISBN: 978-84-9066-368-4
288 págs. (19 €)



EL SECRETO DE LOS NÚMEROS

Dirigido por Julio Mulero, Lorena Segura y Juan M. Sepulcre
Publicaciones Universidad de Alicante, 2016
ISBN: 978-84-9717-490-9
276 págs. (18 €)

EL FENOTIPO EXTENDIDO
EL LARGO ALCANCE DEL GEN

Richard Dawkins
Introducción de Daniel Dennet
Capitán Swing, 2017
ISBN: 978-84-946453-4-1
488 págs. (25 €)



COMPLEJIDAD Y DINÁMICA EN LEIBNIZ
UN VITALISMO ILUSTRADO

Miguel Escribano Cabeza
Editorial Comares, 2017
288 págs. (27 €)



Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Mayo 1967

Energía nuclear

«Hacia 2030, la demanda de energía eléctrica será diez veces nuestra capacidad actual. A causa del esperado descenso de las reservas de combustibles fósiles, y a falta de otra gran fuente de energía a un precio razonable, podría contarse con la energía de fisión para cubrir aproximadamente el 85 por ciento de las necesidades. No obstante, para satisfacer esa demanda con centrales de fisión del tipo actual, se necesitarían unas cantidades de mineral de uranio que pronto agotarían las reservas. Así pues, la era de la fisión se acabaría casi antes de comenzar. Estos hechos dejan claro cuán fuertemente puede depender la "era de la fisión" (a la que acaso siga algún día una "era de la fusión") del éxito en el desarrollo de centrales de reactores reproductores que aprovechen al máximo los recursos disponibles.»

Materia

«De Tales de Mileto se dice que fue el primer filósofo que se preguntó cómo y de qué está hecho el mundo. En retrospectiva, quizá no debió habernos sorprendido tanto el hecho de que algunas de las leyes que gobiernan los átomos sean al parecer diferentes de las que gobiernan el grueso de la materia. Demócrito ya se dio cuenta de que los componentes de la materia eran sustancias diferentes de la materia en sí. Tal como se ha dicho, el átomo nuclear de Ernest Rutherford y Niels Bohr, descrito por la teoría cuántica, se mostró suficiente para explicar toda la química y la mayor parte de la física.»



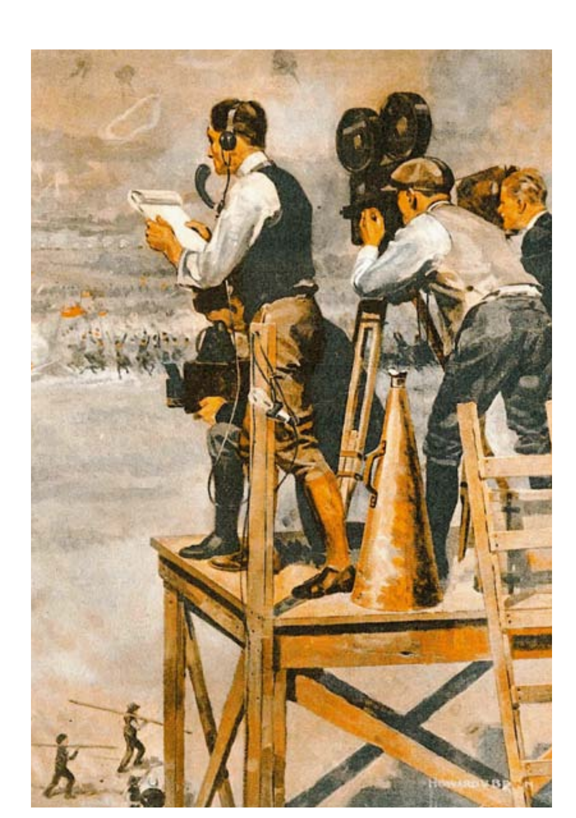
Mayo 1917

Haciendo cine

«Con todo el espacio exterior como escenario y la naturaleza como decorado, la película de cine poseerá siempre una enorme ventaja sobre las producciones teatrales, que necesariamente deben confinar incluso sus esfuerzos más extremos a un escenario comparativamente limitado y una escenografía artificial. Teniendo en cuenta todo ello, los directores de cine trabajan en gran parte en el exterior, y cuando un argumento justifica los gastos e inconvenientes, no dudan en reunir un ejército de actores y hacer uso de un escenario natural cuyas dimensiones se miden en kilómetros y no en metros. En la producción cinematográfica, las grandes escenas son más la excepción que la regla, pues son extraordinariamente caras.»

Darwinismo y guerra

«El nuevo libro del señor Chalmers Mitchell, *Darwinismo y guerra*, es una réplica al argumento a favor de la guerra, tantas veces esgrimido en los últimos tres años por cierta escuela alemana, en el sentido de que un estado de lucha o guerra constantes es un factor dominante de la evolución. Tales autores afirman que la guerra resulta tan necesaria como admirable. Según ellos, constituye una ley biológica a la que el hombre no puede resistirse y que a la larga aporta ventajas porque favorece la supervivencia de las razas más fuertes y dotadas. Sin embargo, el señor Mitchell sostiene: "La selección natural resulta de la conservación de las razas favorecidas y no del exterminio de una raza por otra". No halla nada en común entre el agrupamiento de individuos que forma una nación moderna y el que constituye una raza o especie de animales. En resumen, considera por completo inadmisible el intento de justificar la conducta humana mediante las leyes que supuestamente rigen en el reino animal.»



1917: La magia del cine se traslada al aire libre, con grandes ambiciones, numerosos extras y el mundo como escenario.



Mayo 1867

Heridas de bala

«El doctor V. Gelcich, de Los Ángeles, afirma que distinguir entre un hueso y una bala presenta grandes dificultades con la sonda ordinaria. La suya no es sino un trozo de madera de pino blanco, hecho con la forma de sonda, que se introduce en la herida, se frota contra el objeto indagado y se retira rápidamente; si se trata de un proyectil, en ella se hallarán huellas de plomo. Cuenta que, cuando era oficial médico del Ejército estadounidense, con ese instrumento salvó las extremidades de dos hombres a los que se iba a someter a amputación por heridas de bala en las piernas; con la ayuda de la sonda de pino blanco, lo que tanto tiempo se estuvo suponiendo que era hueso resultó ser plomo.»

A caballo por París

«Un modo francés de monta a caballo: construya un par de ruedas de muy gran tamaño, y coloque una carrocería encima del eje y las astas a tal altura que el caballo pueda andar bajo ella y entre las ruedas. Así conseguirá reunir en uno, al estilo parisino, cochero, caballo y vehículo panorámico, y una elevada posición desde la que ver y ser visto.»

Scientific American, vol. CXVI, n.º 18, 5 de mayo de 1917

NEUROLOGÍA

Un éxito excepcional contra el alzhéimer

Miia Kivipelto y Krister Håkansson

Un ensayo clínico de referencia muestra que la dieta, el ejercicio y una vida social activa ayudan a prevenir el deterioro cognitivo.



ASTROFÍSICA

Cómo tragarse un sol

S. Bradley Cenko y Neil Gehrels

Nuevas técnicas revelan el modo en que los agujeros negros supermasivos destruyen estrellas enteras.



MEDICINA

Bacterias «medicinales»

Michael Waldholz

Mediante la reprogramación de su ADN, se están transformando microorganismos perjudiciales en medicamentos que salvan vidas.

MEDIOAMBIENTE

Los compuestos perfluorados llegan al grifo

Charles Schmidt

Beber agua puede suponer un riesgo para la salud debido a la presencia de estos contaminantes. ¿Hasta qué punto resulta peligroso?



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT Mariette DiChristina
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Krintin Ozelli, Christine Gorman, Clara Moskowitz, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
PUBLISHER AND VICE PRESIDENT Jeremy A. Abbate

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes* y *Larga vida al Hubble*; Andrés Martínez: *Apuntes*, *La diabrótica, la plaga que asola los maizales* y *La invasión de las planarias*; Fabio Teixidó: *Apuntes* y *La fuga de cerebros, tergiversada*; Rosa Pujol: *Complejidad emergente en un sistema de pequeñas moléculas orgánicas*; José Óscar Hernández Sendín: *La promesa de la bioimpresión en 3D* y *¿Soy humano?*; Juan Pedro Adrados: *Misión a Alfa Centauri* y *Remolinos de fuego azul*; Juan M. González Mañas: *Una nueva arma contra el cáncer*; Marián Beltrán: *Pobreza y cerebro infantil*; Alfredo Marcos: *La filosofía de la economía*; Blanca Álvarez: *¿Debe secuenciarse el genoma de los recién nacidos?*; Javier Grande: *Física de las telarañas*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España